

REURI MOREIRA

**ESTUDO DA CORROSÃO DE TROCADORES DE CALOR POR ÁCIDO
CLORÍDRICO NA DECAPAGEM DA COSIPA**

**São Paulo
2008**

**ESP/SO
2008
M815e**

**REURI
MOREIRA**

**Estudo da corrosão de trocadores de calor por ácido clorídrico
na Decapagem da Cosipa**

2008

REURI MOREIRA

**ESTUDO DA CORROSÃO DE TROCADORES DE CALOR POR
ÁCIDO CLORÍDRICO NA DECAPAGEM DA COSIPA**

**Monografia apresentada ao
Programa de Educação Continuada
da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo, para
conclusão de MBA em Siderurgia**

**São Paulo
2008**

REURI MOREIRA

**ESTUDO DA CORROSÃO DE TROCADORES DE CALOR POR
ÁCIDO CLORÍDRICO NA DECAPAGEM DA COSIPA**

**Monografia apresentada ao
Programa de Educação Continuada
da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo, para
conclusão de MBA em Siderurgia**

**Área de Concentração: Engenharia
Metalúrgica e de Materiais**

**Orientadora: Profa. Neusa Alonso-
Falleiros**

São Paulo

2008

DEDALUS - Acervo - EPMT



31800007508

Moreira, Reuri

Corrosão de trocadores de calor por ácido clorídrico /

Reuri Moreira. – São Paulo, 2008

Monografia – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo,
PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica
da USP

1. Engenharia 2. PECE 3. Curso de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, pois sem
Ele nada disso seria possível e aos meus
pais, pelo amor, incentivo e educação que
me deram ao longo de toda minha vida

AGRADECIMENTOS

A professora Neusa Alonso Falleiros, pela orientação, disposição e empenho durante a execução deste trabalho.

Aos amigos: Peterson e Alyne, pelo companheirismo e ajuda em todos os aspectos da minha vida.

Ao Jorge Lúcio e Claudio Camargo, funcionários da Carbone Lorena, pela atenção e solicitude, o qual contribuíram de maneira essencial na execução deste trabalho.

Ao Kadu, cosipano, funcionário da Decapagem, pela ajuda fundamental, contribuindo assim nos primeiros e últimos passos para a execução desta monografia.

RESUMO

Este trabalho consiste na análise da corrosão de trocadores de calor em blocos de grafite que operam estão instalados nas linhas de Decapagens da Laminação à Frio da Cosipa, e gerar uma discussão se esta realmente é a melhor escolha para a aplicação.

Primeiramente estão expostos os tipos mais comuns de trocadores existentes e suas aplicações. Logo em seguida estão apresentadas as formas de corrosão, suas características físicas, mecanismos e meios corrosivos. Estão expostas também as características do ácido clorídrico.

Foi feita uma análise dos trocadores que estão fora de operação, pretende-se analisar o comportamento destes face à corrosão e apresentar soluções práticas de combate ao mesmo para maximizar o tempo de operação dos mesmos e minimizar o tempo de paradas para manutenção.

O principal foco da análise da corrosão é na região onde há o contato dos fluídos que realizam a troca térmica, no caso ácido clorídrico e vapor de água, pois as consequências da corrosão são mais severas. Como exemplo tem-se a perda de carga, gerando graves problemas para os tubos, conexões, válvulas, e principalmente para o sistema de bombeamento, reduzindo a eficiência de troca térmica, comprometendo a operação do equipamento e ocasionando paradas emergenciais devido à degradação precoce do equipamento e a obstrução da passagem do fluído devido ao acúmulo de sujeira.

ABSTRACT

This paper consists in studying the behavior of graphite blocks heat exchanger that it is installed at the Cosipa Scouring Line and check if it is the better choice for the application.

First of all, it is showed the most used heat exchangers and their applications. In the following, it is presented the corrosion types and their physical characteristics, mechanisms and corrosion environment, as well, the hydrochloric acid properties.

The heat exchanger that it is out of order was analyzed. It is desired to study the behavior of it face to the corrosion and to show practical solutions to maximize the equipment operation time and to minimize the scheduled and emergency maintenance time.

The paper focus is to study the corrosion on the area where there is the contact among the fluids that execute the thermal exchange, in this case, hydrochloric acid and vapor water, because the corrosion consequences are more severe, as example: power loss, consequently, there are more problems to some pieces, such as: pipes, connections, valves and mainly the pump system, as a result of this, decreases the heat exchange efficiency. Also, the numbers of maintenance emergencies increase due to the grime and the corrosion products that obstruct the fluid passage.

Keywords: Corrosion. Heat Exchanger. Graphite. Scouring Line. Hydrochloric acid. Vapor water.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Trocador de calor instalado em uma planta fabril.....	13
Figura 2 - Trocador de calor em corte mostrando os principais componentes.....	15
Figura 3 – Espelho mostrando a fixação dos tubos.....	16
Figura 4 - Carcaça e os bocais do trocador.....	17
Figura 5 – Cabeçote e chicanas longitudinais.....	18
Figura 6 – Exemplos de chicanas usadas em trocadores.....	20
Figura 7 – Componentes de um trocador de placas e o fluxo dos fluídos.....	22
Figura 8 – Trocadores de calor montados e a diferentes placas.....	23
Figura 9 – Trocador de calor recém instalado.....	25
Figura 10 – Corrosão no trocador após operação.....	25
Figura 11 – Escoamento no interior do trocador de blocos de grafite.....	27
Figura 12 – Componentes de um trocador de calor em blocos de grafite.....	28
Figura 13 – Diferentes tipos de correntes que escoam pela carcaça – áreas sujeitas à incrustação.....	31
Figura 14 – Exemplo da corrosão do ácido clorídrico devido ao contato com uma peça de aço carbono.....	32
Figura 15 – Chapa de aço carbono que sofreu corrosão.....	36
Figura 16 – Placa com corrosão generalizada.....	39
Figura 17 – Tubo com corrosão por placas.....	39
Figura 18 – Peça com corrosão alveolar.....	40
Figura 19 – Tubo com corrosão puntiforme ou por pite.....	40
Figura 20 – Corrosão intergranular ou intercristalina.....	41
Figura 21 – Corrosão intragranular ou transgranular ou transcristalina.....	42
Figura 22 – Corrosão filiforme.....	42
Figura 23 – Corrosão por esfoliação.....	43
Figura 24 – Tubo com corrosão gráfitica.....	44
Figura 25 – Rotor que sofreu dezincificação.....	44
Figura 26 – Seção transversal de um tubo apresentando empolamento pelo hidrogênio.....	45

Figura 27 – Região soldada apresentando corrosão.....	46
Figura 28 – Corrosão galvânica entre o flange e a estrutura.....	47
Figura 29 – Corrosão no interior do tubo do trocador de calor tipo casco-tubo.....	53
Figura 30 – Corrosão biológica no espelho do trocador.....	54
Figura 31 – Desenho esquemático de uma linha de decapagem.....	56
Figura 32 – Seção transversal do trocador evidenciando os furos nos blocos.....	57
Figura 33 – Corrosão-erosão na extremidade da carcaça do trocador.....	58
Figura 34 – Detalhe da corrosão-erosão na extremidade da carcaça do trocador.....	58
Figura 35 – Corrosão na região de contato das chicanas com a carcaça.....	59
Figura 36 – Detalhe da corrosão na região de contato das chicanas com a carcaça.....	59
Figura 37 – Produtos da corrosão da carcaça nos blocos de grafite.....	60
Figura 38 – Corrosão na parte interna do cabeçote.....	61
Figura 39 – Produtos da corrosão nos orifícios dos blocos.....	61
Figura 40 – Detalhe dos produtos da corrosão nos orifícios dos blocos.....	62
Figura 41 – Seção do trocador evidenciando a instalação de buchas de grafite.....	65
Figura 42 – Seção do trocador evidenciando a instalação de chapas defletoras.....	66

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.6.1 – Relações de material e meio prejudiciais do ponto de vista da corrosão.....	37
TABELA 3.1 – Avaliação qualitativa dos trocadores propostos.....	64

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	13
1. REVISÃO DE LITERATURA.....	13
1.1. TROCADOR DE CALOR.....	13
1.2. TIPOS DE TROCADORES DE CALOR.....	14
1.2.1. Trocador de calor tipo casco-tubo.....	14
1.2.1.1. Tubos.....	15
1.2.1.2. Espelhos.....	15
1.2.1.3. Carcaça e os bocais da carcaça.....	17
1.2.1.4. Cabeçotes.....	18
1.2.1.5. Chicanas longitudinais.....	19
1.2.1.6. Chicanas	19
1.2.1.7. Características.....	20
1.2.2. Trocador de calor de placas.....	21
1.2.2.1. Características.....	23
1.2.3. Trocador de calor em blocos de grafite.....	26
1.2.3.1. Características.....	29
1.3. INCRUSTAÇÃO.....	29
1.4. ÁCIDO CLORÍDRICO.....	31
1.5. CORROSÃO.....	33
1.5.1. Conceitos básicos.....	33
1.5.2. Velocidade de corrosão.....	34
1.5.3. Mecanismos da corrosão.....	35
1.5.4. Formas de corrosão.....	37
1.5.4.1. Uniforme.....	39
1.5.4.2. Por placas.....	39
1.5.4.3. Alveolar.....	40
1.5.4.4. Puntiforme ou por pite	40
1.5.4.5. Intergranular ou intercristalina.....	41
1.5.4.6. Intragranular ou transgranular ou transcristalina.....	41

1.5.4.7. Filiforme.....	42
1.5.4.8. Por esfoliação.....	43
1.5.4.9. Grafítica.....	43
1.5.4.10. Dezincificação.....	44
1.5.4.11. Empolamento pelo hidrogênio	45
1.5.4.12. Em torno de cordão de solda.....	45
1.5.4.13. Corrosão galvânica	46
1.5.4.14. Corrosão sob tensão.....	47
1.5.4.15. Corrosão sob fadiga.....	48
1.5.4.16. Corrosão-erosão.....	48
1.5.4.17. Corrosão por atrito.....	49
1.5.4.18. Fragilização pelo hidrogênio.....	49
1.5.4.19. Corrosão em concreto.....	49
1.5.4.20. Corrosão atmosférica	50
1.5.4.21. Corrosão microbiológica.....	51
1.5.5. Corrosão em trocadores de calor.....	52
1.5.5.1. Perdas de eficiência.....	52
1.5.5.2. Paradas de emergência do equipamento.....	53
1.5.5.3. Vazamentos.....	54
1.5.5.4. Poluição do meio ambiente.....	54
2. DESENVOLVIMENTO.....	56
2.1. TROCADOR DE CALOR DA LINHA DE DECAPAGEM DA COSIPA.....	56
2.2. ANÁLISE DA CORROSÃO NO TROCADOR.....	57
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
3.1. COMPARATIVO ENTRE OS TROCADORES APRESENTADOS.....	63
3.2. PROPOSTAS DE PROTEÇÃO CONTRA A CORROSÃO.....	65
4. CONCLUSÃO.....	67
5. RECOMENDAÇÕES.....	68
REFERÊNCIAS.....	69

INTRODUÇÃO

1. REVISÃO DE LITERATURA

1.1. TROCADOR DE CALOR

O trocador de calor é um equipamento que realiza a troca térmica entre dois fluídos, um fluído denominado frio, de temperatura mais baixa e um fluído quente, de temperatura mais alta.

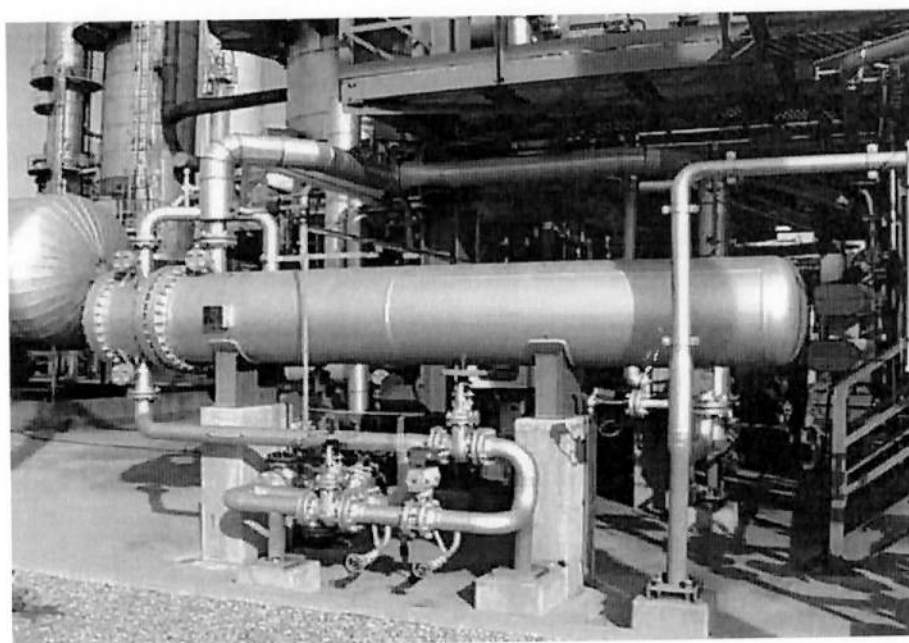


Figura 1 – Trocador de calor instalado em uma planta fabril²

Trocadores de calor são equipamentos largamente usados na indústria siderúrgica, química, petroquímica, naval, petrolífera e metalúrgica. Onde existem fluídos circulando em um circuito fechado, haverá um trocador de calor presente na linha para resfriar o determinado fluído e retorná-lo ao no processo.

Os trocadores de calor operam com os mais variados fluídos, a saber: água, água do mar, ácidos, gases, óleos e derivados de petróleo.

Atualmente esses equipamentos são fabricados com materiais nobres, como: aço inox, titânio e alumínio, materiais estes com um grau elevado de resistência à corrosão, porém, dependendo da aplicação, dos fluidos que escoam no equipamento e da quantidade desejada de trocadores, a aquisição de um equipamento fabricado com materiais nobres fica totalmente inviável do ponto de vista financeiro².

1.2. TIPOS DE TROCADORES DE CALOR

Os três tipos de trocadores mais usados na indústria são: casco-tubo, de placas e o de blocos em grafite.

1.2.1. Trocador de calor tipo casco-tubo^{2,8,10}

Os trocadores de calor tipo casco-tubo são trocadores mais usados em indústrias devido ao seu baixo custo e confiabilidade de operação.

O projeto de um trocador tipo casco-tubo baseia-se na troca térmica entre dois fluídos, um fluído escoa na carcaça, externamente aos tubos e o outro escoa no interior dos tubos, aumentando assim a temperatura de um e diminuindo a temperatura do outro⁹.

Abaixo, na figura 2, se encontra o descritivo dos principais componentes de um trocador de calor multitubular:

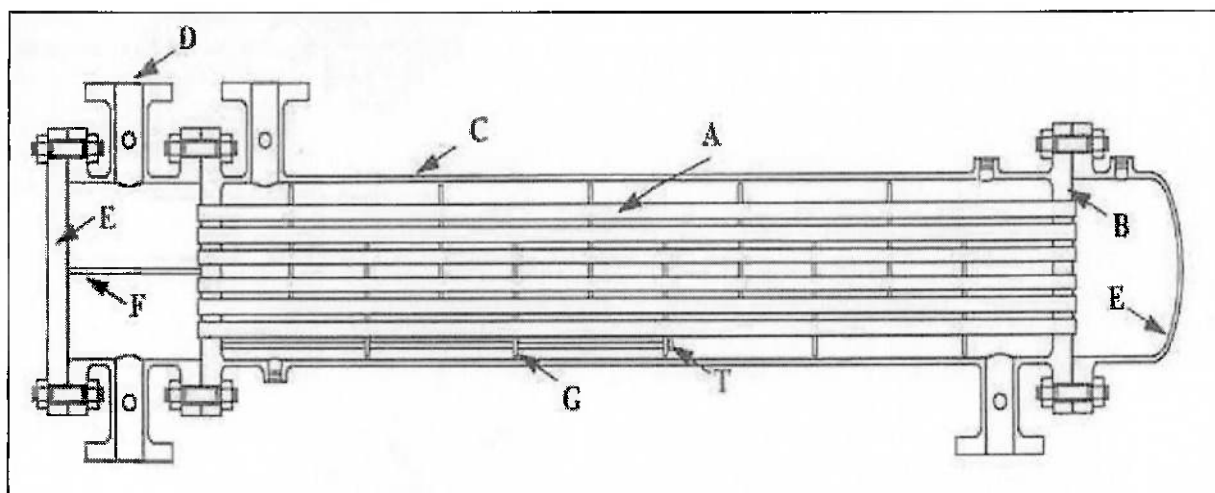


Figura 2 - Trocador de calor em corte mostrando os principais componentes²

1.2.1.1. Tubos

Os tubos mostrados na figura 2, item A, são componentes básicos do trocador, pois através destes se promove a troca térmica entre o fluido que escoa no interior dos tubos e o fluido que escoa na carcaça. Os tubos normalmente utilizados são sem costura, embora se possam encontrar trocadores de tubos com costura. Eles são usualmente fabricados com um dos seguintes materiais: aço de baixo teor de carbono, aço baixa liga, aço inoxidável, cobre, cobre-níquel, alumínio e suas ligas e titânio.

1.2.1.2. Espelhos

Os Espelhos mostrados na figura 2, item B e figura 3 são elementos de fixação das extremidades dos tubos no interior do trocador. Os tubos são fixados ao espelho por meio de solda ou por meio de recalque denominada de mandrilamento. No caso de serem soldados, os espelhos e os feixes de tubos

devem ser do mesmo material a fim de evitar efeitos nocivos como o da corrosão. São permitidos revestimentos de superfície apropriados para evitar este efeito nocivo.

Normalmente, a periferia cilíndrica do espelho fica em contato com a atmosfera, o que permite detectar qualquer vazamento. Além disso, no projeto de trocadores de calor, o material do espelho deve ser especificado corretamente, pois ele ficará em contato com os dois fluídos, não sendo rara a situação em que o espelho sofra em uma de suas faces um tratamento metalúrgico (metalização) a fim de resistir às condições de operação.

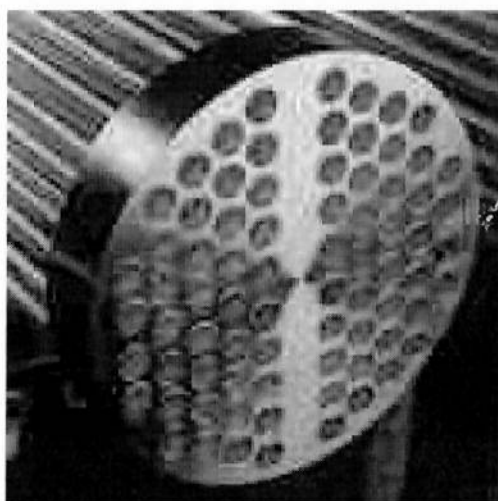


Figura 3 – Espelho mostrando a fixação dos tubos¹¹

1.2.1.3. Carcaça e os bocais da carcaça

A Carcaça e o Bocal são os itens C e D respectivamente da figura 2.

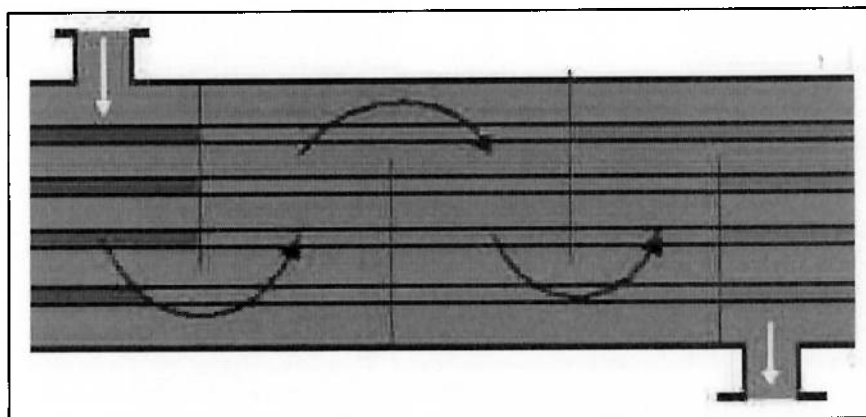


Figura 4 - Carcaça e os bocais do trocador¹¹

A carcaça é o elemento que encerra o feixe de tubos, as chicanas e os tirantes, figura 4.

Usualmente a carcaça é feita a partir de chapas conformadas e costuradas longitudinalmente, exceto no caso de carcaças de dimensões reduzidas ($\leq 0,6$ m) quando podem ser feitas a partir de tubos sem costura.

A circularidade da carcaça é extremamente importante, pois será ela que ditará o diâmetro das chicanas, e destes dois diâmetros (da carcaça e da chicana) resultará a fração de fluido que escoará axialmente através da folga radial entre ambos.

Em trocadores de grandes dimensões, por razões econômicas, a carcaça é sempre que possível de aço de baixo carbono, evitando-se utilizar materiais mais nobres.

O bocal é o meio de acesso do fluído para o interior do trocador. É usual no bocal de entrada de trocadores de calor multitubulares o emprego de uma placa de dispersão, cuja finalidade é evitar o impacto direto no fluído que ingressa na carcaça sobre o feixe de tubos, e ao mesmo tempo diminuir os efeitos nocivos de vibração e cavitação. No dimensionamento do trocador deve-se considerar o aumento da perda de carga no lado da carcaça provocado pelo uso da placa de dispersão.

1.2.1.4. Cabeçotes

O cabeçote, figura 2, item E e figura 5, tem como finalidade controlar e orientar o escoamento no feixe de tubos. Via de regra, o fluido corrosivo escoar no interior dos tubos, e neste caso tanto os cabeçotes como os bocais de entrada e saída dos tubos são feitos com materiais ligados, de modo a obter-se compatibilidade com tubos e espelhos no que diz respeito ao aspecto de corrosão. Os cabeçotes são parafusados aos espelhos. Ao removerem-se os cabeçotes, permite-se a inspeção dos tubos e até mesmo a sua eventual substituição.

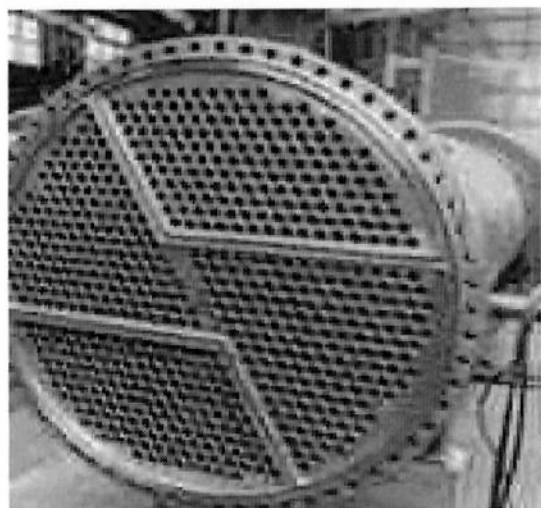


Figura 5 – Cabeçote e chicanas longitudinais¹¹

1.2.1.5. Chicanas longitudinais

Tem a finalidade de promover a multiplicidade de passagens das correntes dos fluidos no trocador, tanto interior dos tubos como na carcaça, como mostra na figura 5. No caso de trocadores multi-passagens no interior dos tubos, as chicanas podem ser fundidas em conjunto com o próprio cabeçote. Se o cabeçote for feito, por exemplo, a partir dos tubos, as chicanas longitudinais são soldadas em seu interior.

Nas carcaças de múltiplas passagens, as chicanas longitudinais são sempre soldadas em seu interior. No caso de trocadores de múltiplas passagens, as chicanas longitudinais precisam ser convenientemente fixadas, a fim de evitar vazamentos de um compartimento ao outro, o que prejudicaria o desempenho do equipamento.

1.2.1.6. Chicanas

As chicanas têm basicamente três funções:

- suportar o feixe de tubos em sua posição durante a montagem e operação;
- atenuar os efeitos de vibrações oriundos de correntes secundárias e
- ser elemento que permite aumentar a capacidade de troca térmica do trocador, visto que proporciona o escoamento em corrente cruzada.

Os tipos mais comuns de chicanas estão ilustrados na figura 6. A circular segmentada que normalmente tem um corte cuja dimensão é entre 20 e 25% do diâmetro da carcaça. Permite-se também situações onde esta porcentagem pode chegar a 45% (no caso de escoamento de gases a baixa pressão), com o intuito de minimizar a perda de carga. Outro tipo é a coroa-disco, a qual é usada para escoamento de gases s em alta velocidade, com uma perda de carga menor.

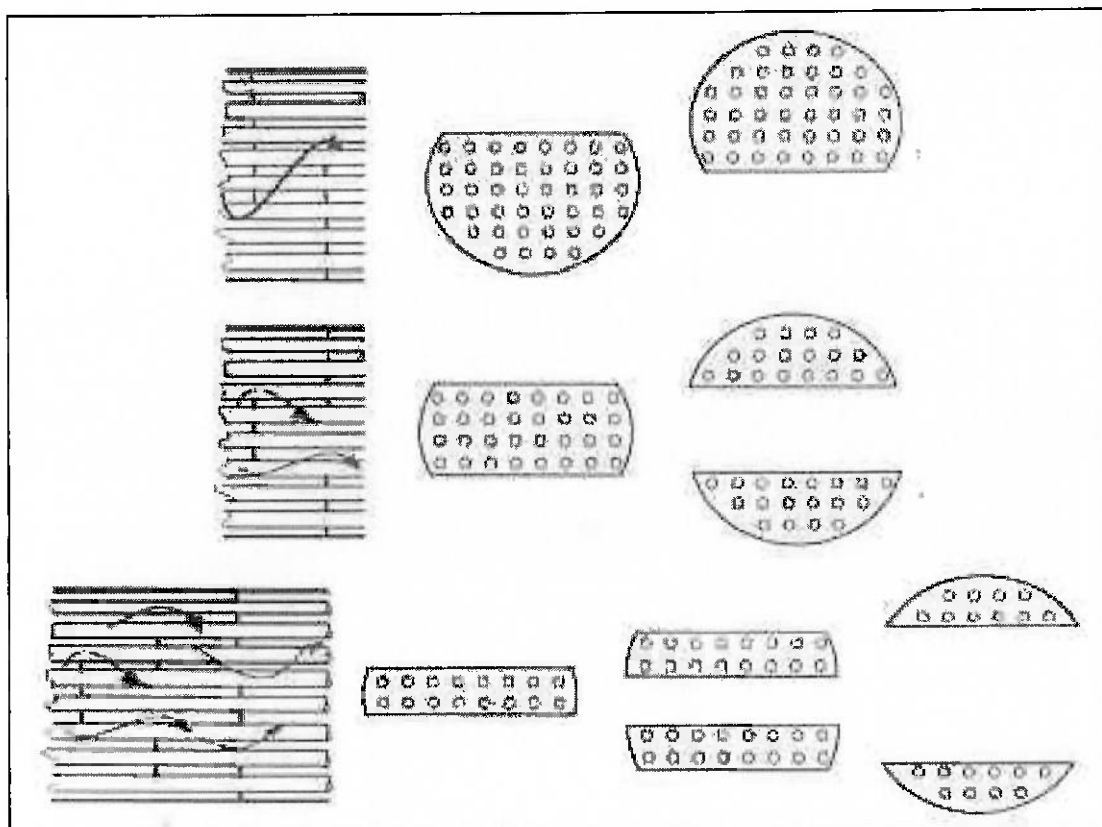


Figura 6 – Exemplos de chicanas usadas em trocadores²

1.2.1.7. Características

Segue as características dos trocadores de calor tipo casco-tubo com relação à manutenção, espaço físico e corrosão:

- **Manutenção:** a facilidade de manutenção desse tipo de trocador não é um de seus atributos. São necessárias escovas rotativas para se efetuar a desobstrução do interior dos tubos devido ao acúmulo de depósitos e a remoção de incrustações no lado externo do mesmo. Quando não há êxito na desobstrução do tubo ou quando este apresenta trincas ou furos, inutiliza-se o mesmo, fechando as suas extremidades, com isso, após a inutilização de 5% do total de tubos do trocador, o rendimento térmico do trocador sofre um decréscimo, fazendo com que este opere fora das especificações iniciais de

projeto comprometendo assim toda a instalação na qual o trocador está montado;

- Espaço físico: dentre os trocadores existentes, o trocador de casco-tubo é o que demanda maior espaço físico para sua instalação para uma mesma eficiência térmica comparada aos demais modelos, com isso, não é aplicável em situações que exista uma restrição com relação ao espaço físico ou peso;
- Corrosão: a corrosão é um aspecto que limita muito a utilização dos trocadores de casco-tubo. Os tubos podem ser confeccionados com materiais mais nobres, resistentes à corrosão, porém os componentes externos, como a carcaça por exemplo não, pois inviabilizaria a construção do mesmo devido ao alto custo.

1.2.2. Trocador de calor de placas

O trocador de calor de placas é um equipamento que assim como o de casco-tubo, realiza a troca térmica entre dois fluídos.

A concepção do projeto deste tipo de trocadores é muito diferente, quando comparado ao trocador tipo casco-tubo, uma grande vantagem deste tipo de trocador é sua compacidade. A troca térmica se dá através do fluxo em contracorrente dos dois fluídos em questão, que são separados por finas placas corrugadas, conforme mostra a figura 7. Estes corrugados têm a função de aumentar a área de troca térmica e criar uma turbulência no fluxo dos fluídos, por isso esses trocadores possuem uma maior eficiência de troca térmica, muitas vezes a transferência de calor chega a ser cinco vezes maior que os trocadores de casco-tubo⁶.

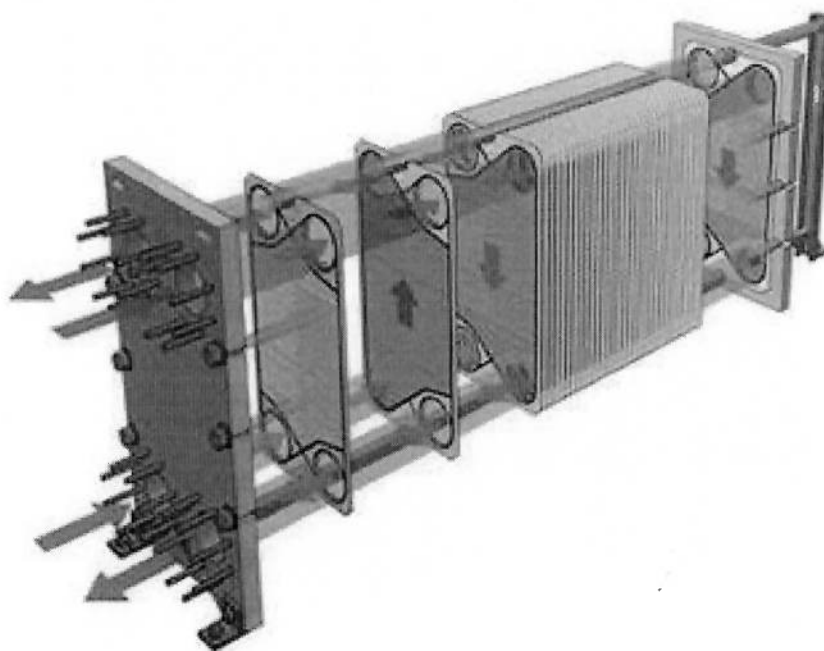


Figura 7 – Componentes de um trocador de placas e o fluxo dos fluídos⁶

As placas corrugadas são montadas entre as placas principais e fixadas por tirantes. Elas são unidas umas nas outras e são vedadas com gaxetas, cordões de soldas, brasagem ou anéis do tipo Viton, dependendo de sua aplicação, fluido e temperatura dos mesmos⁶.

Na figura 8 são mostrados trocadores montados e a variedade de placas existentes, com tamanhos e formas diferentes, variando de acordo com sua aplicação.

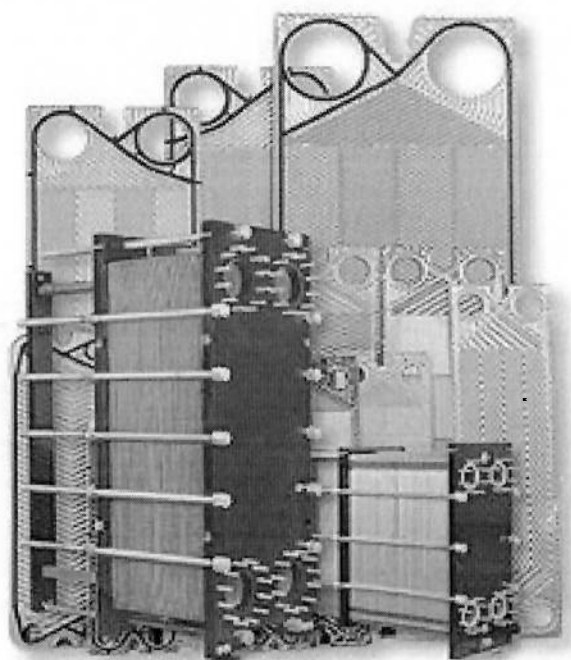


Figura 8 – Trocadores de calor montados e a diferentes placas⁶

1.2.2.1. Características^{1,3}

Este trocador é usado nas indústrias: farmacêutica, química, petrolífera, alimentícia, bebidas e indústria naval.

As características deste tipo de trocador com relação à manutenção, espaço físico, flexibilidade de operação e corrosão, serão expostos a seguir:

- **Manutenção:** a manutenção nesses trocadores no geral é pequena, visto que eles operam com baixa vazão, diminuindo a manutenção na bomba e nos demais componentes do circuito. Devido à alta turbulência no escoamento, os depósitos não se acumulam na superfície da chapa, diminuindo assim as intervenções no equipamento;

- Espaço físico: este trocador é o mais compacto que existe, face à alta eficiência de troca térmica que o mesmo possui;
- Flexibilidade de operação: o trocador de placas é facilmente desmontável, e é possível aumentar ou reduzir o coeficiente global de troca térmica, simplesmente aumentando ou reduzindo o número de placas do conjunto, respectivamente;
- Corrosão: as placas são geralmente fabricadas de aço liga, aço inoxidável e titânio, são materiais resistentes à corrosão, entretanto não são 100% imunes à corrosão, conforme mostrado na figura 10 ou ao ataques de ácidos, como é o caso do ácido clorídrico.

Na figura 9 está exposto um trocador de calor antes de sua partida e na figura 10, o mesmo trocador após 6 meses de operação, nota-se a presença de corrosão dos flanges das linhas e principalmente nas chapas intermediárias do trocador.

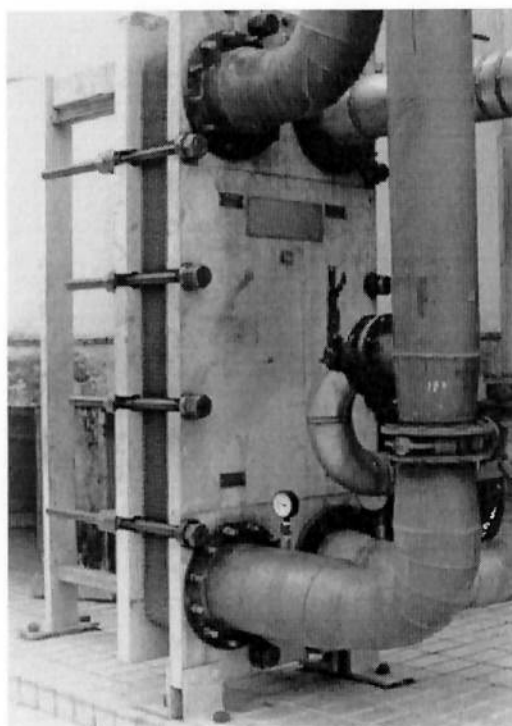


Figura 9 – Trocador de calor recém instalado⁷

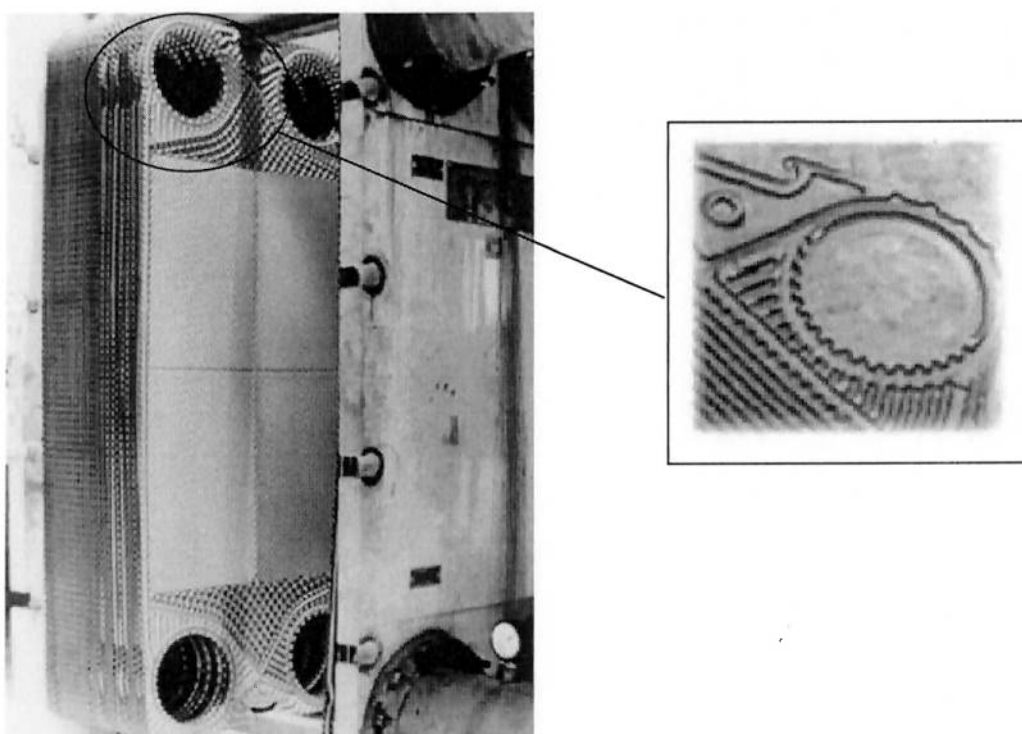


Figura 10 – Corrosão no trocador após operação⁷

Conforme já mencionado, o que limita a aplicação deste tipo de trocador de calor é quando se deseja operar com fluídos ácidos, pois os aços ligados e aços inoxidáveis não resistem ao ataque destes e quando se pretende operar com fluídos altamente viscosos, pelo fato das passagens entre chapas serem pequenas não favorecem ao escoamento de fluídos viscosos, pois é necessária uma alta energia de bombeamento para o deslocamento do mesmo.

1.2.3. TROCADOR DE CALOR EM BLOCOS DE GRAFITE⁵

Na concepção do projeto, os trocadores de calor em blocos de grafite são muito parecidos com os trocadores de casco-tubo, há a troca térmica entre dois fluídos, geralmente em contra-corrente (os fluídos escoam em sentidos opostos), o que diferencia um do outro é exatamente a parte interna do trocador, onde em vez de haver um feixe de tubos, há blocos de grafite montados um sobre o outro, contendo orifícios axialmente e radialmente por onde escoam o fluídos, realizando assim a troca térmica entre eles.

Semelhantemente ao trocador de casco-tubo, o fluído que escoar na carcaça executa um movimento alternativo quando este escoar pela parte externa dos blocos de grafite, percorrendo assim todos os blocos existentes até o orifício de saída do fluído. Em certas configurações de trocador, o fluído que escoar no interior dos blocos pode executar também um movimento alternativo, denomina-se este movimento de passe, na figura 11 temos o exemplo do escoamento no interior do trocador, no lado esquerdo um trocador com dois passes nos blocos e no lado direito um trocador com apenas um passe nos blocos.

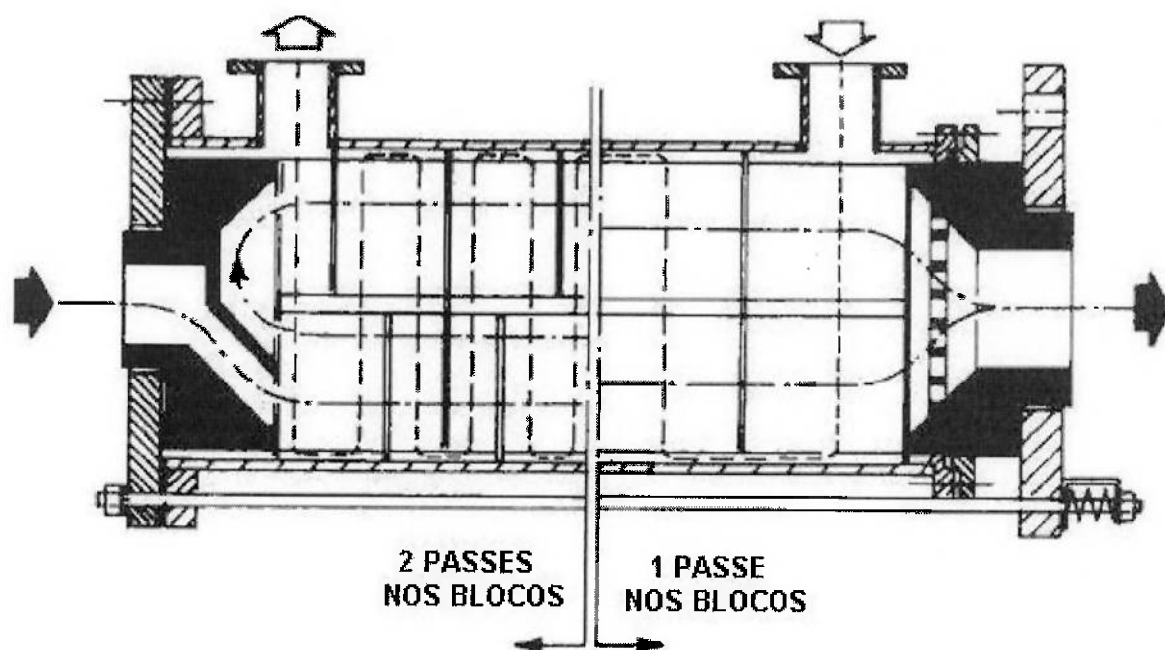


Figura 11 – Escoamento no interior do trocador de blocos de grafite⁵

Segue abaixo o descritivo dos principais componentes dos trocadores de calor em blocos de grafite:

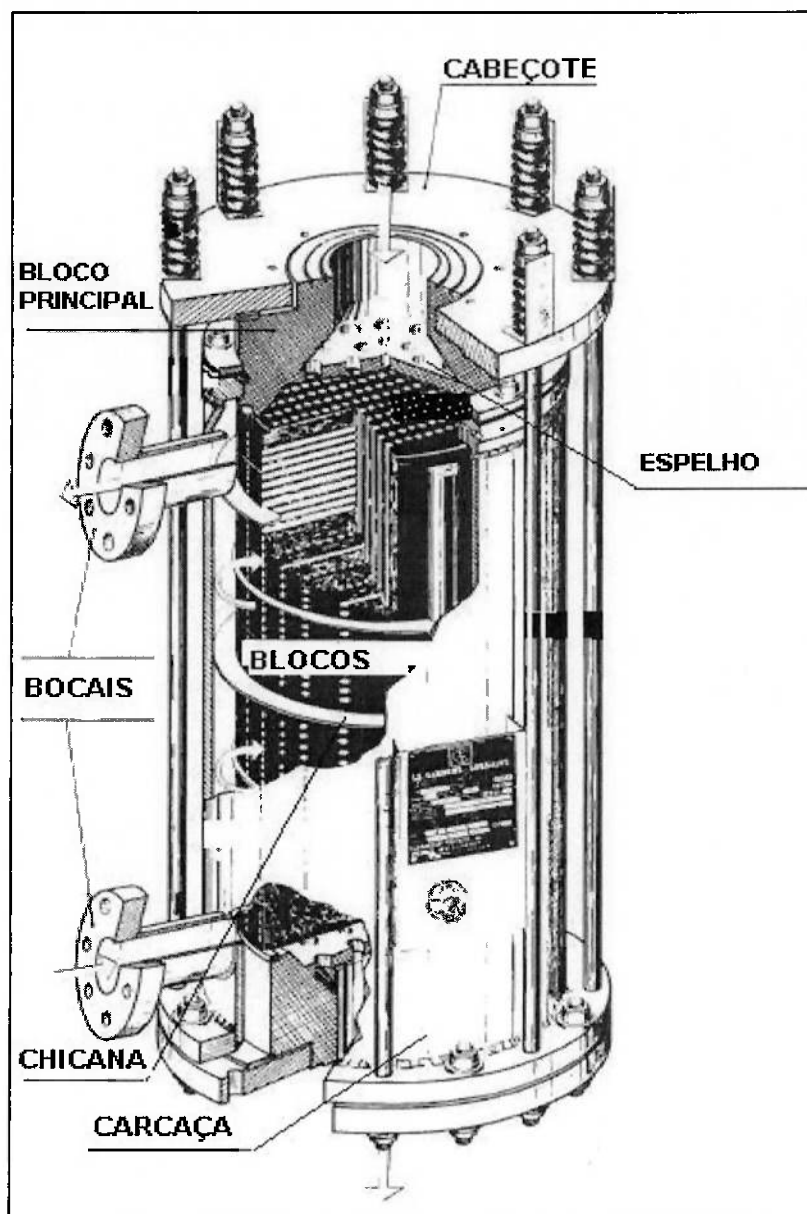


Figura 12 – Componentes de um trocador de calor em blocos de grafite⁵

1.2.3.1. Características

Os trocadores de calor de blocos de grafite têm as seguintes características:

- Espaço físico: os trocadores são compactos, podendo ser utilizados em diversas aplicações onde há pouco espaço disponível, sem haver a diminuição da eficiência de troca térmica;
- Manutenção: é extremamente simples a sua manutenção e limpeza. Após a abertura da carcaça, os blocos podem ser facilmente substituídos, pois são encaixados uns nos outros;
- Corrosão: o grafite é um material que possui alta resistência à corrosão, resiste muito bem ao ataque de ácidos;
- Confiabilidade de operação: pelo fato do grafite ser resistente à corrosão e à temperatura, o número de paradas de manutenção, corretiva ou preventiva diminui consideravelmente;
- Flexibilidade de alteração da área de troca térmica: caso haja alguma alteração das variáveis do processo, como a vazão e a temperatura e seja necessário aumentar troca térmica entre os dois fluídos, basta aumentar o número de blocos do trocador, desde que haja espaço suficiente o interior da carcaça.

1.3. INCRUSTAÇÃO²

Incrustação pode ser definida como o acúmulo indesejável de substâncias sobre a superfície de troca térmica.

Em geral, o crescimento indesejado deste depósito resulta em uma performance inferior dos trocadores de calor.

A incrustação pode ocorrer tanto em sistemas naturais, como em sistemas sintéticos. A arteriosclerose é um exemplo de incrustação no corpo humano, o aumento de placas de gordura nas artérias provoca um bloqueio do fluxo de sangue e exige um aumento de esforço do coração.

No presente contexto, incrustação se refere especificamente ao depósito de substâncias sobre a área de troca térmica.

A incrustação interfere no desempenho do trocador de calor de várias formas, entre elas estão a perda de carga e a eficiência térmica.

Com o aumento da perda de carga devido a dificuldade de fluxo nos sistema, exige-se mais potência nas bombas, e com o depósito sobre a superfície de troca térmica, acrescenta-se uma resistências maior à troca de calor no interior do trocador.

Para amenizarem-se estes efeitos, o trocador de calor deve sofrer manutenção e limpeza periodicamente.

A incrustação tem uma forte influência sobre o projeto do trocador de calor, e pode determinar um acréscimo no material na fabricação empregado de modo a facilitar a limpeza entre os tubos. Conseqüentemente, incrustação causa um grande prejuízo, pois têm um impacto direto sobre os custos iniciais, custos de operação e performance do trocador de calor.

O acúmulo de sujeira é depositado geralmente onde há a passagem do fluído, conforme mostrado na figura 13.

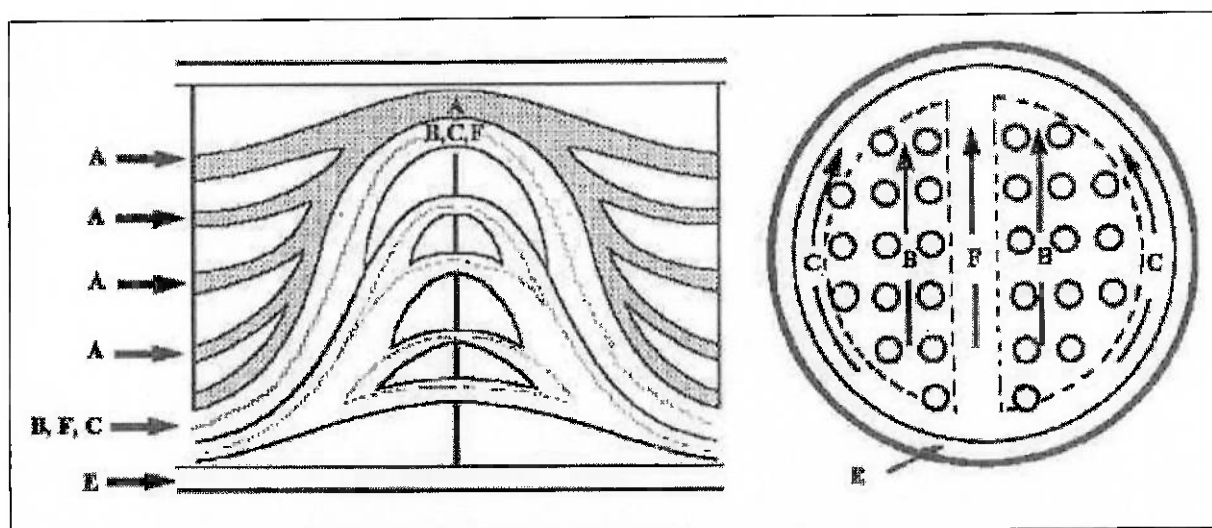


Figura 13 – Diferentes tipos de correntes que escoam pela carcaça – áreas sujeitas à incrustação²

1.4. ÁCIDO CLORÍDRICO⁴

O composto químico ácido clorídrico, também conhecido como cloreto de hidrogênio, quando não está em sua forma pura como gás, é uma solução aquosa, fortemente ácida, visto que o valor do seu pH varia de 0 a 2, e extremamente corrosiva, conforme figura 14, que mostra um exemplo de corrosão do aço carbono devido a presença de ácido clorídrico, o mesmo deve ser manuseado apenas com as devidas precauções. Ele é normalmente utilizado como reagente químico, e é um dos ácidos fortes que se ioniza completamente em solução aquosa. Uma solução aquosa de HCl na concentração de 1 mol/L tem $\text{pH} = 0$.

Em sua forma comercial e de baixa pureza é conhecido como ácido muriático (muriático significa pertencente a salmoura ou a sal), sendo vendido sob essa designação para a remoção de manchas resultantes da umidade em pisos e paredes de pedras, azulejos, tijolos e outros.

Em sua forma mais pura, "P.A." (Pureza Analítica), ele é um reagente comum em laboratórios e encontrado em uma solução com 37% em massa.

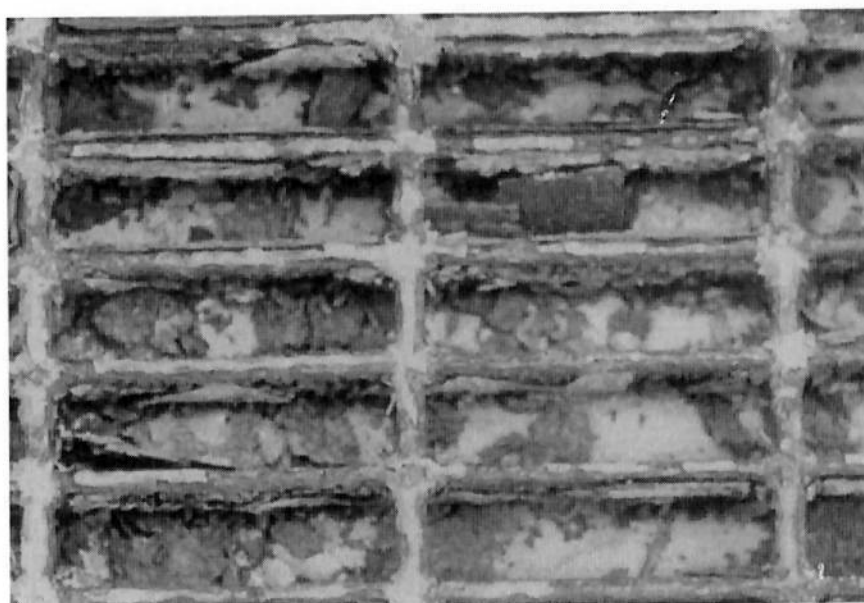


Figura 14 – Exemplo de corrosão de uma peça de aço carbono por exposição ao ácido clorídrico⁷

Convém mencionar os riscos que o ácido clorídrico apresenta, são eles:

- **Risco à saúde:** irritação severa das vias respiratórias quando inalado, podendo causar edema pulmonar. O contato com a pele causa queimaduras, pode causar dermatites. O contato prolongado do ácido leva ao dano visual e até a perda da visão. Caso seja ingerido pode causar a queima nas mucosas da boca e no sistema digestivo;
- **Risco ao meio-ambiente:** afeta rios e cursos d'água, alterando o pH da água. Pode contaminar o solo. Os vapores podem afetar temporariamente a qualidade do ar.
- **Reações químicas e físicas:** reage com metais como: ferro, alumínio, zinco, magnésio, formando hidrogênio, que misturado com o ar poderá causar explosão e deslocamento do ar em caso de ignição em condições específicas.

E também as propriedades físico-químicas:

- **Estado físico:** líquido a temperatura ambiente
- **Cor:** incolor (ligeiramente amarelado)
- **Odor:** pungente, penetrante e irritante
- **pH:** 0 – 2
- **Ponto de Ebulição:** 110 °C (solução com 30% HCl em peso)
- **Ponto de Fusão:** -15,3 °C (solução com 45% HCl em peso)
- **Ponto de Fulgor:** produto não inflamável

1.5. CORROSÃO

1.5.1. Conceitos básicos⁷

A corrosão é definida como a deterioração de um material pela ação química ou eletroquímica do meio, em associação ou a não a esforços mecânicos. O estudo da corrosão tem grande importância no meio tecnológico, uma vez que o desgaste, as variações químicas e as alterações estruturais destes materiais causam a perda de equipamentos, acidentes e elevados custos de manutenção dos mesmos, tornando-os inadequados para o uso.

As consequências da corrosão de equipamentos e estruturas como por exemplo: aeronaves, viadutos e dutos põem em risco vidas humanas, sem falar no aspecto econômico, estruturas metálicas enterradas, torres de linha de transmissão, equipamentos eletrônicos de grande porte, reatores, trocadores de calor e

caldeiras representam investimentos vultosos, para isso é necessário que eles tenham durabilidade e resistência à corrosão, justificando assim os altos valores de investimento.

Portanto, os elevados custos associados aos estudos dos processos corrosivos e no desenvolvimento de novas técnicas de prevenção à corrosão se justificam devido aos grandes danos e prejuízos que esta pode causar.

1.5.2. Velocidade de corrosão⁷

A velocidade de corrosão, também conhecida como cinética da corrosão refere-se à velocidade das reações de corrosão, o qual definirá o tempo de vida útil do equipamento ou estrutura em questão.

Existem diversos fatores que influenciam a velocidade ou taxa de corrosão, são eles:

- oxigênio dissolvido: no início do processo a corrosão é elevada, e decresce à medida que se forma a camada de óxido, que funciona como barreira na difusão do oxigênio. O aumento do oxigênio acelera a corrosão por consumir os elétrons gerados anodicamente. Como exemplo, para água destilada há um teor crítico de oxigênio no qual a taxa decresce:

aumenta até = 12ml/l

decresce > 12 ml/l

- pH: entre pH 4 e 10 a taxa de corrosão depende diretamente da difusão de O_2 para a superfície. As águas em geral situam-se nesta faixa de pH, a taxa de corrosão não varia muito para diferentes tipos de aços. Quando o pH > 10 a taxa diminui, pois o Fe se torna passivo na presença de álcalis e oxigênio dissolvido e quando o pH < 4 há um aumento na velocidade de corrosão, pois

existe a possibilidade de redução de H^+ além de O_2 . A difusão de O_2 facilita o desprendimento de H_2 que depende da sobretensão.

- temperatura: geralmente a temperatura acelera o processo corrosivo pois há maior difusão de íons, porém, pode desacelerar a corrosão por diminuir a concentração de oxigênio dissolvido.
- sais dissolvidos: podem retardar o processo devido à precipitação de produtos da corrosão, diminuição da solubilidade de oxigênio e ação passivadora ou podem acelerar em decorrência da ação despolarizante e aumento da condutividade.

1.5.3. Mecanismos da corrosão⁷

A grande parte dos metais são encontrados na forma de minérios, que são compostos químicos destes metais, as exceções são: ouro, platina, mercúrio e prata. A transformação destes compostos químicos em metais só é possível com a adição de uma grande quantidade de energia, como na fabricação do aço.

Os compostos que possuem conteúdo energético inferior aos dos metais são relativamente estáveis, por isso, os metais tendem a sofrer uma reação de espontânea quando expostos em meios líquidos e gasosos. O ferro “enferruja”, conforme mostrado na figura 15 e o alumínio escurece quando expostos ao ar.

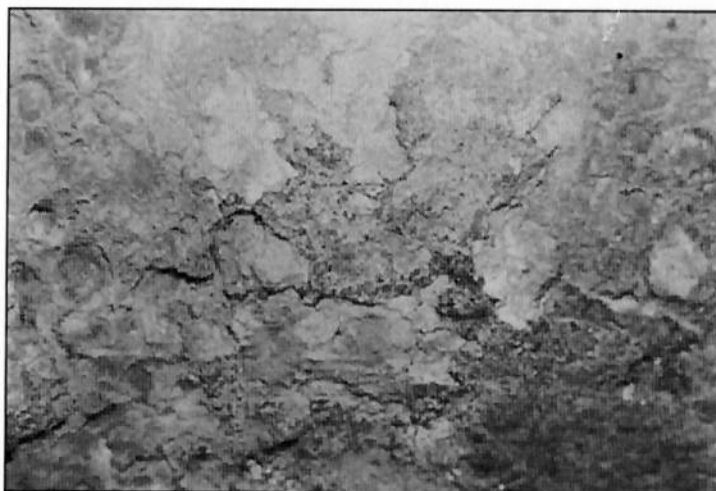
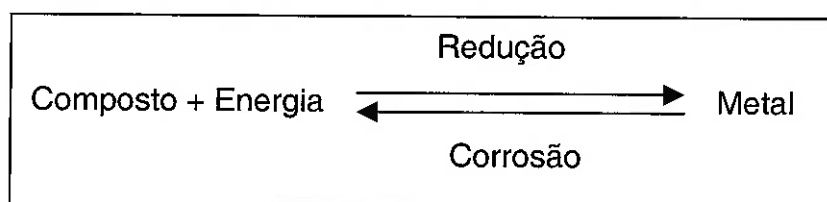


Figura 15 – Chapa de aço carbono que sofreu corrosão⁷

Quando o metal entra em contato com o meio ambiente, por estar numa condição de não-estabilidade conseguida através do processo de fabricação, tende, espontaneamente, a retornar ao seu estado natural ou de menor energia, também chamado de condição de estabilidade. Sendo assim pode-se definir a corrosão como o processo contrário do processo siderúrgico, pois muitas vezes o produto da corrosão de um determinado metal é bem similar ao do minério do qual ele foi extraído.



Cada metal, ou liga tem uma resistência maior ou menor à corrosão, fator que está diretamente relacionado com o meio no qual o mesmo está exposto. Mesmo os metais nobres, que são considerados materiais com elevada resistência à corrosão, dependendo do meio que eles se encontram, estes podem sofrer sim efeitos da corrosão.

É certo que podemos afirmar que para cada combinação de um dado metal e um meio corrosivo, acarretam um dano maior ou menor ao metal do ponto de vista do processo corrosivo.

Logo abaixo encontra-se uma tabela de metal e meio, onde são mostradas as combinações entre eles que são extremamente prejudiciais:

TABELA 1.6.1 – Relações de material e meio prejudiciais do ponto de vista da corrosão⁷

Metal	Meio
Aço-Carbono	Água do Mar
Aço Inoxidável	HCl, H ₂ S, SO ₃
Alumínio	HCl, NaOH, SO ₃
Magnésio	HNO ₃
Cobre	HCl, NH ₃
Titânio	H ₂ SO ₄ , H ₂ O _{2conc} , SO ₃
Prata	HCl _{concentrado}
Ouro	HCl + HNO ₃
Platina	HNO _{3fumegante}

1.5.4. Formas de corrosão⁷

Os processos de corrosão são considerados reações eletroquímicas heterogêneas que se passam geralmente na superfície de separação entre o metal e o meio corrosivo.

Levando-se em consideração que a oxidação-redução é uma reação que consiste em ceder ou receber elétrons, pode-se afirmar que os processos de oxidação são reações de oxidação dos metais, ou seja, o metal age como redutor, cedendo elétrons que são recebidos por uma substância, o oxidante que está presente no

meio corrosivo. Concluí-se que a corrosão é o processo de destruição do metal, progredindo através de sua superfície.

A corrosão tem diferentes formas ou tipos e podem ser classificadas de acordo com sua aparência ou forma de ataque e as diferentes causas da corrosão e seus mecanismos. Elas são classificadas segundo:

- a morfologia – uniforme, por placas, alveolar, puntiforme ou por pite, intergranular ou intercristalina, intragranular ou transgranular ou transcristalina, filiforme, por esfoliação, grafítica, dezincificação, em torno de cordão de solda e empolamento pelo hidrogênio;
- as causas ou mecanismos – por aeração diferencial eletrolítica ou por correntes de fuga, galvânica, associada a solicitações mecânicas (corrosão sob tensão fraturante), em torno de cordão de solda, seletiva (grafítica e dezincificação), empolamento ou fragilização pelo hidrogênio;
- os fatores mecânicos – sob tensão, sob fadiga, por atrito, associada à erosão;
- o meio corrosivo – atmosférica, pelo solo, induzida por microrganismos, pela água do mar e por sais fundidos;
- a localização do ataque – por pite, uniforme, intergranular e transgranular.

As características fundamentais de acordo com a classificação segundo a morfologia fornece dados importantes para entender os mecanismos de corrosão, bem como as medidas adequadas para a proteção do metal sob influência do agente oxidante.

1.5.4.1. Uniforme

A corrosão uniforme, que também é chamada de corrosão generalizada, se caracteriza pela corrosão por igual em toda extensão da superfície ocorrendo assim a perda uniforme de espessura. A terminologia “generalizada” também se aplica à corrosão uniforme.



Figura 16 – Placa com corrosão generalizada⁷

1.5.4.2. Por placas

A corrosão se localiza em certas regiões da superfície metálica e não em toda sua extensão, formando placas com escavações.

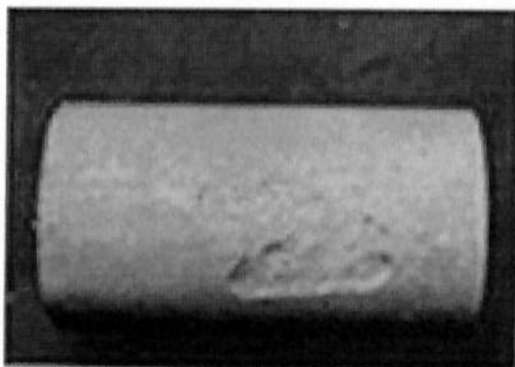


Figura 17 – Tubo com corrosão por placas⁷

1.5.4.3. Alveolar

A corrosão ocorre na superfície metálica gerando sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos, apresentando fundos arredondados e geralmente tem a profundidade menor que o seu diâmetro.



Figura 18 – Peça com corrosão alveolar⁷

1.5.4.4. Puntiforme ou por pite

A corrosão apresenta em pontos localizados ou em pequenas áreas ao longo da superfície metálica produzindo pites, que são orifícios que apresentam o fundo na forma de ângulo e profundidade geralmente maior que o diâmetro.



Figura 19 – Tubo com corrosão puntiforme ou por pite⁷

1.5.4.5. Intergranular ou intercristalina

A corrosão acontece entre os grãos da malha cristalina do material metálico, o qual pode fraturar quando submetido a uma determinada tensão devido à perda de suas propriedades mecânicas, tendo-se então a corrosão sob tensão fraturante (CTF).

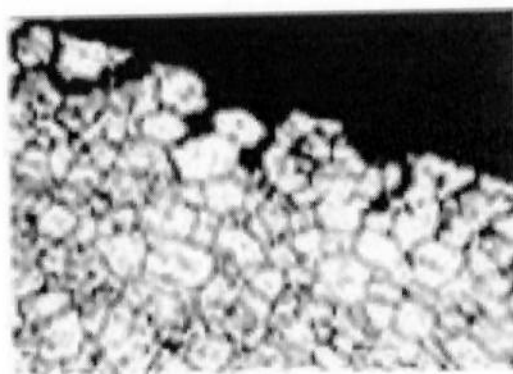


Figura 20 – Corrosão intergranular ou intercristalina⁷

1.5.4.6. Intragranular ou transgranular ou transcristalina

A corrosão ocorre nos grãos da rede cristalina do material metálico, sendo assim quando o material é submetido a tensões este pode vir a fraturar devido a perda de suas propriedades mecânicas, tem-se também a corrosão sob tensão fraturante (CTF).

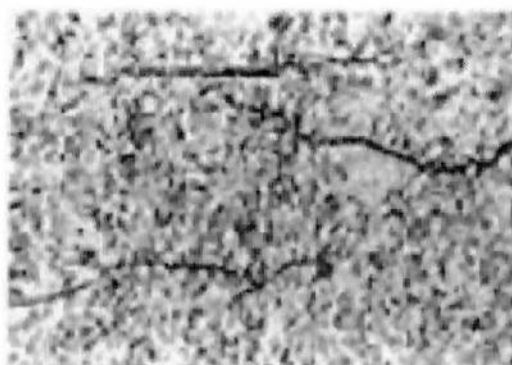


Figura 21 – Corrosão intragranular ou transgranular ou transcristalina⁷

1.5.4.7. Filiforme

A corrosão se processa na forma de finos filamentos, mas de profundidade pequena que se propagam em direções diferentes e que não se ultrapassam, pois o produto da corrosão em estado coloidal apresenta carga positiva, sendo assim, as mesmas apresentam repulsão. Este tipo de corrosão ocorre geralmente em superfícies metálicas revestidas com tintas ou metais, causando um deslocamento do revestimento. Observa-se com mais frequência em lugares muito úmidos, quando a umidade relativa do ar é maior que 85%.

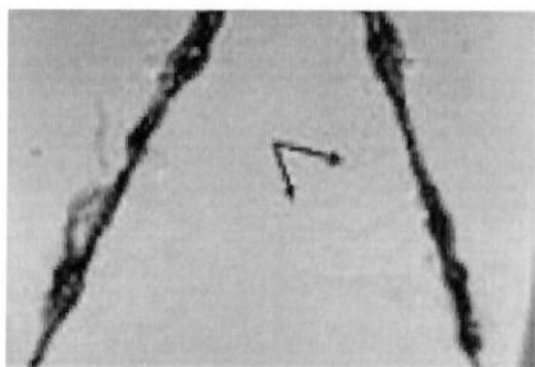


Figura 22 – Corrosão filiforme⁷

1.5.4.8. Por esfoliação

A corrosão se apresenta de forma paralela à superfície metálica. Este tipo de corrosão ocorre em placas ou materiais extrudados que tiveram seus grãos alongados e achatados, criando condições para que inclusões ou segregações presentes no material, sejam transformadas devido ao trabalho mecânico em plaquetas alongadas. Quando se dá início ao processo de corrosão em ligas de alumínio que foram previamente trabalhadas, o ataque pode atingir as inclusões ou segregações alongadas e a corrosão se processará através de planos paralelos à superfície e com mais frequência nas frestas. O produto da corrosão com maior volume, ocasiona a separação das camadas onde existe a corrosão, e como consequência disto ocorre a desintegração do material em forma de placas paralelas à superfície. Essa forma de corrosão ocorre com maior constância em liga de alumínio das séries 2000 (Al, Cu, Mg), 5000 (Al, Mg) e 7000 (Al, Zn, Cu, Mg).

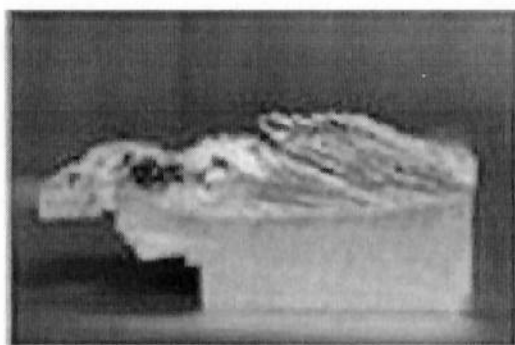


Figura 23 – Corrosão por esfoliação⁷

1.5.4.9. Grafítica

Este tipo de corrosão ocorre com o ferro fundido cinzento em temperatura ambiente, sendo o ferro metálico convertido em produtos de corrosão, no caso a grafite intacta. A área corroída fica com um aspecto escuro, característica da grafite.



Figura 24 – Tubo com corrosão gráfitica⁷

1.5.4.10. Dezincificação

Ocorre em ligas de cobre-zinco, também conhecida por latão. A oxidação ocorre primeiramente no zinco, restando apenas o cobre, daí o fato desse tipo de oxidação apresentar regiões de coloração avermelhada, destacando a presença do cobre após o processo de oxidação do zinco. A dezincificação e a corrosão gráfitica são exemplos de corrosão seletiva, pois tem-se a corrosão preferencial de zinco e ferro, respectivamente.

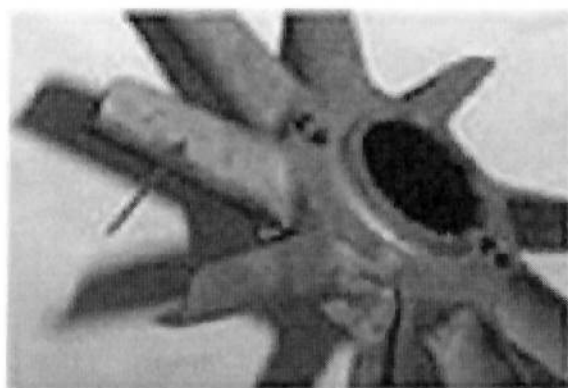


Figura 25 – Rotor que sofreu dezincificação⁷

1.5.4.11. Empolamento pelo hidrogênio

Átomos de hidrogênio penetram no material metálico e, devido ao seu pequeno volume atômico, este se difunde rapidamente em regiões com descontinuidades, como por exemplo inclusões e vazios. O hidrogênio se transforma em hidrogênio molecular, exercendo pressão e originando a formação de bolhas, daí a origem do nome empolamento.

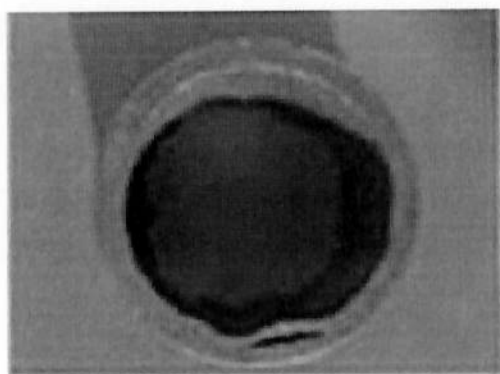


Figura 26 – Seção transversal de um tubo apresentando empolamento pelo hidrogênio⁷

1.5.4.12. Em torno de cordão de solda

A corrosão em torno de cordões de solda ocorre em aços inoxidáveis não-estabilizados ou com teores de carbono maiores que 0,03%, e a corrosão se processa intergranularmente. O processo ocorre devido ao empobrecimento localizado do teor de cromo, próximo aos carbonetos de cromo precipitados.

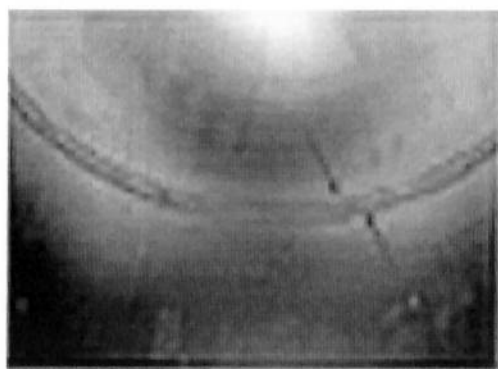


Figura 27 – Região soldada apresentando corrosão⁷

1.5.4.13. Corrosão galvânica

Ocorre quando são feitas as uniões de metais com diferentes potenciais de corrosão, a corrente é gerada do metal com maior tendência à corrosão, mais ativo, para o metal com menor, mas nobre, figura 28. Um fator preponderante é a relação entre as áreas dos diferentes metais, se a área do metal com maior tendência à corrosão for muito pequena comparada à do metal mais nobre, haverá no ponto de contato entre os dois metais uma alta densidade de corrente, ocasionando uma alta taxa de corrosão no material anódico. É por esta razão que se usa parafusos e rebites de material mais nobres comparados ao metal base. Outra solução é revestir um dos materiais com isolamento elétrico.

É possível existir a inversão de polaridades, ou seja, o metal de maior tendência à oxidação funcionar como catodo e vice-versa, os fatores que influenciam este fenômeno são a temperatura e a formação de películas protetoras. Um exemplo deste fenômeno ocorre quando há a junção de zinco e ferro, acima de 60 °C o zinco se torna catodo em relação ao ferro.



Figura 28 – Corrosão galvânica entre o flange e a estrutura⁷

1.5.4.14. Corrosão sob tensão

É a corrosão devido ao efeito freqüente de tensões de tração na presença de um meio corrosivo. As variáveis que estão diretamente ligadas à este tipo de corrosão são: temperatura, tensão, composição do material e do meio. Os fatores metalúrgicos também são fatores importantes a serem considerados, pois influenciam no processo corrosivo, são eles: orientação dos grãos, composição e distribuição dos precipitados.

O início do processo corrosivo é visto como um pite, que ao reduzir a área da seção transversal, a tensão aumenta. A velocidade de propagação da trinca aumenta até a ruptura do material, um detalhe importante é que não há perda de massa de material.

Os meios aquosos inorgânicos são mais propícios para a corrosão sob tensão, por exemplo, o aço inoxidável que sofre CST em meio de ácido sulfídrico e cloreto e ligas de alumínio em meios com cloreto e ligas de cobre na presença de amônia e aminas.

1.5.4.15. Corrosão sob fadiga

Esforços cíclicos em associação à um meio corrosivo podem levar à ruptura completa de componentes metálicos num espaço de tempo menor que o previsto quando o material está submetido à um destes fatores separadamente. As falhas geralmente ocorrem em níveis de tensão abaixo do limite de escoamento do material e após susceptíveis aplicações de tensão. As ligas mais propícias à este tipo de corrosão são aquelas que possuem uma camada protetora que foram rompidas durante a propagação da trinca.

1.5.4.16. Corrosão-erosão

Devido ao movimento relativo de um determinado fluído sobre um metal, ocorre a remoção de material por ação mecânica. O filme de passivação sobre o metal protege a superfície do mesmo deste ataque até que seja rompida esta proteção, sendo que a velocidade de formação, resistência e a capacidade de recomposição do filme determinam sua capacidade de proteção. As duas formas de corrosão mais conhecidas relacionadas à este processo são: o impingimento e a cavitação.

O impingimento ocorre quando há a colisão frontal do fluído em alta velocidade com o material metálico, geralmente observa-se o ataque em regiões de curvaturas de tubos.

A cavitação é uma forma de corrosão associada ao colapso de bolhas de vapores de líquidos sobre a superfície metálica. O choque ocasionado pelo colapso provoca um dano visível, dando um aspecto rugoso à superfície. Ocorre predominantemente em equipamentos rotativos, como: hélices, turbinas, bombas ou em qualquer outra superfície onde há o contato de líquido à alta velocidade ou diferença muito bruscas de pressão.

1.5.4.17. Corrosão por atrito

Este tipo de corrosão é característico de componentes de motores, aparecem em forma de pites onde há atritos entre peças metálicas causando a remoção de fragmentos do metal devido ao movimento relativo entre as superfícies. O desgaste por atrito depende da atmosfera, temperatura, carga e frequência de oscilação.

1.5.4.18. Fragilização pelo hidrogênio

O surgimento de trincas devido à interação do hidrogênio com o material pode ocorrer através dos mais diferentes mecanismos. O hidrogênio atômico possui um tamanho muito pequeno, facilitando assim a sua mobilidade. Após a sua absorção na superfície do material, ele é facilmente difundido no interior do mesmo ou transportado durante a movimentação das discordâncias, alojando-se nos interstícios da rede cristalina do metal base. Imperfeições na rede cristalina são pontos onde o hidrogênio se aloca, ele também pode interagir com precipitados, microporos ou contornos de grãos.

A fragilização pelo hidrogênio ocorre pela difusão e precipitação do hidrogênio molecular (H_2). A pressão exercida sobre o material e a concentração de hidrogênio são fatores determinantes para a formação de micro bolhas no material.

1.5.4.19. Corrosão em concreto

Estruturas de concreto são praticamente imunes ao processo corrosivo devido ao alto teor de pH, na faixa de 12,5 a 13,5 presentes na fase líquida retida nos poros de concreto. Ocorre assim a passivação do aço no interior da estrutura, formando um filme protetor sólido que protege o aço da ação corrosiva. Fatores como o pH e o teor de oxigênio no meio influenciam diretamente a característica do filme

protetor. Portanto, deterioração das estruturas de concreto pode-se dar mecanicamente, através de choques de partículas sólidas existentes no ar ou no líquido ou quimicamente, por:

- Despassivação: devido à presença de cloreto;
- Carbonatação: processo lento com a redução do pH por presença de gás carbônico;
- Redução do pH do concreto em regiões com grandes concentrações de ácidos e por presença de bactérias.

1.5.4.20. Corrosão atmosférica

A corrosão atmosférica é classificada de acordo com o grau de umidade em:

- Seca: lenta oxidação do metal com a formação de óxidos, geralmente protetora, exemplo: escurecimento da prata;
- Úmida: formação de filmes finos de eletrólito com a velocidade do processo sendo diretamente proporcional à umidade relativa do ambiente;
- Molhada: associada à deposição de chuva ou névoa salina na superfície metálica.

As atmosferas que classificam o processo corrosivo podem ser divididas em:

- Industrial: caracterizada pela presença de óxidos de enxofre que com a umidade, forma ácido sulfúrico;
- Marinha: particulados salinos que são carregados pelo vento causando a corrosão galvânica ou aeração diferencial;
- Rural: meio menos agressivo, sendo o principal contaminante a umidade.

1.5.4.21. Corrosão microbiológica

A corrosão microbiológica é caracterizada pela deterioração de um material devido à presença de micro ou macro organismos vivos, como bactérias ou algas, respectivamente. Eles são sustentados por reações químicas, ingerindo reagentes e eliminando produtos indesejáveis. Os organismos estão presentes nos mais variados meios, como: água do mar, rios, regiões pantanosas, solos com resíduos orgânicos ou sais de sulfatos, nitratos, fosfatos ou enxofre, sedimentos oleosos e sistemas de refrigeração.

Os microorganismos são classificados em dois grupos, de acordo com sua capacidade de crescimento: aeróbicos, com a presença de oxigênio ou sem a presença de oxigênio, os anaeróbicos. A bactéria que com frequência é causadora de processos corrosivos é a *Dessulfotomaculum desulfuricans* que tem a capacidade de reduzir o sulfato em sulfeto, por isso ela é denominada de bactéria redutora de sulfato.

O sulfeto gerado tende a acelerar a corrosão do material tendo como produto de corrosão um precipitado de íon de sulfeto combinado com Fe^{+2} .

As bactérias aeróbicas são capazes de oxidar elementos contendo enxofre a ácido sulfúrico, esses organismos necessitam da presença de enxofre em sua forma elementar ou combinada, criando assim um ambiente altamente corrosivo e ácido. A corrosão em tubulações que ficam sob o solo (tubulações enterradas), podem estar associadas às condições que o solo favorece para presença de um ou outro tipo de microorganismo. Exemplificando, solos seco e com facilidade de penetração do ar, favorece à existência e o crescimento de bactérias oxidantes de enxofre ao passo que solos úmidos, ausentes de oxigênio, permitem que as bactérias redutoras se desenvolvam.

Existem outros tipos de bactérias que estão associadas direta ou indiretamente aos processos corrosivos, como por exemplo as que utilizam hidrocarbonetos como fonte de alimentos, danificando revestimentos asfálticos; bactérias que oxidam amônia em ácido nítrico ou bactérias que assimilam íon ferroso da solução e precipitam com hidróxidos. Outros tipos de ataque microbiológico se referem à formação de sulfeto de cobre em aquecedores e válvulas de cobre e suas ligas pela presença de bactérias redutoras de sulfato e ainda a corrosão de tanques de armazenamento de combustível devido à contaminação por microorganismos e a presença de água onde o fungo *cladosporium resinae* produz na interface água/querosene, um material sólido com aspecto de lama.

1.5.5. Corrosão em trocadores de calor

A corrosão em trocadores de calor deve ser analisada como um assunto de suma importância, pois ela influencia diretamente os seguintes fatores:

- Perdas de eficiência;
- Paradas de emergência no equipamento;
- Vazamentos;
- Poluição do meio ambiente.

1.5.5.1. Perdas de eficiência

A eficiência de troca térmica de um trocador é a taxa de troca de calor que existe entre os dois fluídos, um denominado fluído quente e o outro denominado fluído frio. A corrosão afeta diretamente a eficiência de troca térmica, pois causa interferências no escoamento, principalmente quando ocorre nos tubos, no caso de trocadores tipo casco-tubo, gerando perdas de carga e por consequência o decréscimo de velocidade de escoamento do fluído. Outro fator que a corrosão afeta é o fato de que os óxidos presentes na área corroída, mudam completamente o valor da condutividade térmica no qual o trocador foi

dimensionado e também na liberação de partículas, ocasionando a contaminação dos fluídos e até mesmo a obstrução e completa inutilização do tubo conforme mostra a figura 29.

Os danos causados em todo o circuito devido à perda da eficiência de troca térmica em que o trocador está instalado pode ser desde uma simples contaminação do fluído até o comprometimento dos equipamentos instalados neste circuito: a substituição precoce de sobressalentes de bombas, válvulas, tubulações e do próprio trocador, uma vez que a temperatura do fluído quente está acima da especificada no projeto para os componentes e equipamentos mencionados e a perda carga induzida no sistema gera um esforço adicional da bomba, podendo até ocasionar a queima do motor da mesma.

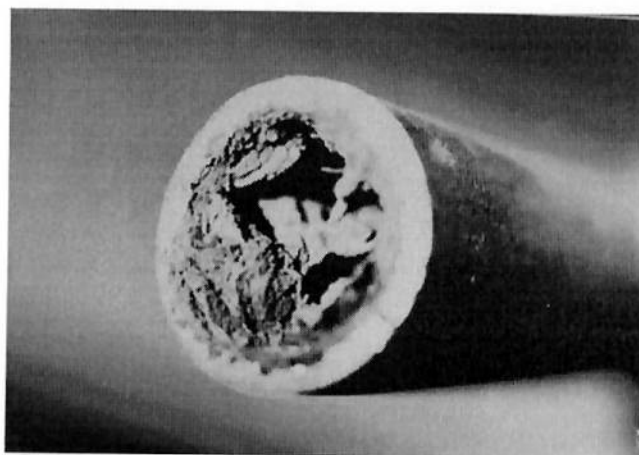


Figura 29 – Corrosão no interior do tubo do trocador de calor tipo casco-tubo⁷

1.5.5.2. Paradas de emergência do equipamento

Intervenções de emergências em equipamentos são prejudiciais do ponto de vista econômico, pois o equipamento deixa de produzir e com isso deixa de gerar lucro para a empresa. A figura 30 mostra um trocador fora de operação devido à corrosão microbiológica. A manutenção programada comparada à manutenção corretiva é melhor, pois é feita com base numa programação do melhor dia e

horário que a planta, ou parte dela, deve parar para a manutenção, além de que são perfeitamente conhecidos os itens que serão trocados ou reparados durante a intervenção, minimizando assim o tempo de intervenção.

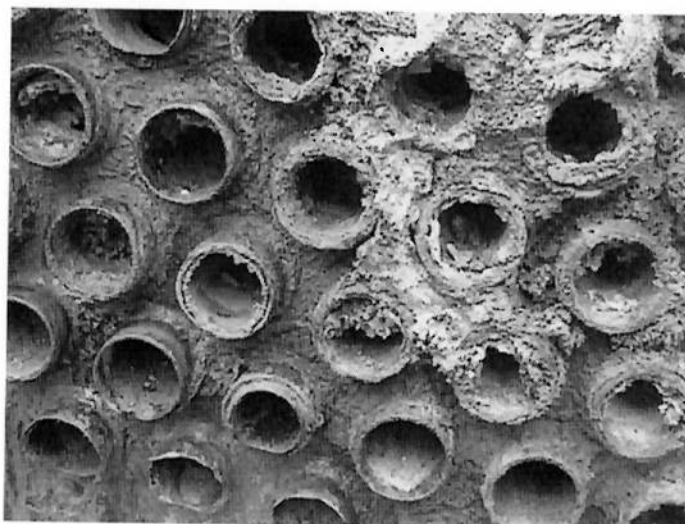


Figura 30 – Corrosão biológica no espelho do trocador⁷

1.5.5.3. Vazamentos

Vazamentos em trocadores de calor são muito danosos, pois quando o fluido vaza dos tubos, o fluido que escoar na carcaça é contaminado pelo mesmo, ocasionando assim danos no circuito do fluido que escoar na carcaça, uma vez que este circuito não foi dimensionado para escoar com o fluido em questão. Caso ocorra o vazamento do fluido através da carcaça ou de algum outro ponto do equipamento para o meio externo, este pode provocar sérios acidentes se forem fluidos inflamáveis ou ácidos.

1.5.5.4. Poluição do meio ambiente

Dependendo da extensão do vazamento e do tipo de fluido, quando o mesmo atinge o meio externo pode causar impactos ambientais irreversíveis, como a contaminação de lagos, rios, nascentes, lençóis freáticos, mares e a contaminação

do solo, impossibilitando assim o crescimento de árvores e plantas na região onde a empresa está instalada.

Os gastos com multas, indenizações, processos judiciais e recuperação ambiental caso a empresa seja diretamente responsabilizada pelo impacto ambiental são altíssimas, podendo até levar a empresa à falência.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. TROCADOR DE CALOR DA LINHA DE DECAPAGEM DA COSIPA¹³

As Decapagens têm como principal finalidade remover a camada de óxido (ferrugem) formada na superfície da tira após o processo de Laminação de Tiras a Quente. Essa remoção é feita através da imersão da chapa em tanques com ácido clorídrico, em velocidade controlada. Assim, o material é oleado, protegendo a superfície já limpa contra oxidação e preparando a matéria prima para o Laminador de Tiras a Frio. O ácido usado para remoção do óxido é recuperado nas Unidades de Regeneração de HCl e devolvido para linha para novamente executar seu papel de remoção dos óxidos de novas bobinas.

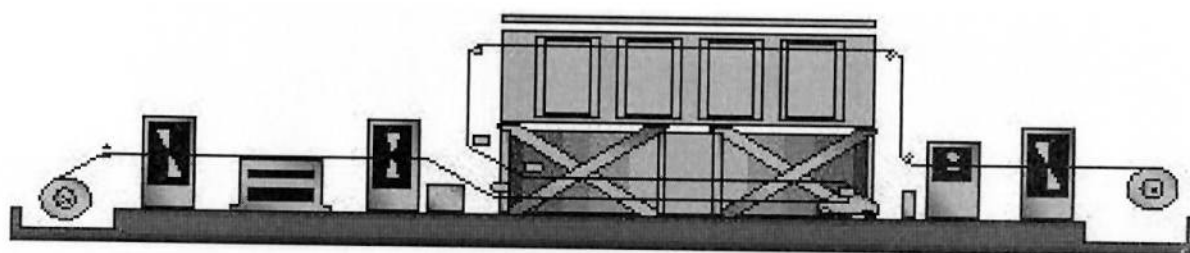


Figura 31 – Desenho esquemático de uma linha de decapagem¹³

Os trocadores utilizados nas linhas de Decapagem da Laminação são os trocadores tipo casco com blocos em grafite, são muito parecidos com o de casco-tubo, diferem apenas na sua parte interna, pois são compostos por blocos devidamente furados e encaixados uns nos outros, de modo que se possa garantir a vedação do líquido de um compartimento para outro e a ausência de contaminação de um fluido com o outro. A sua função basicamente é elevar a temperatura do ácido clorídrico, através da troca térmica com o vapor de água, para que o mesmo seja utilizado durante a remoção de óxidos através da imersão da chapa laminada nos tanques de ácido clorídrico.

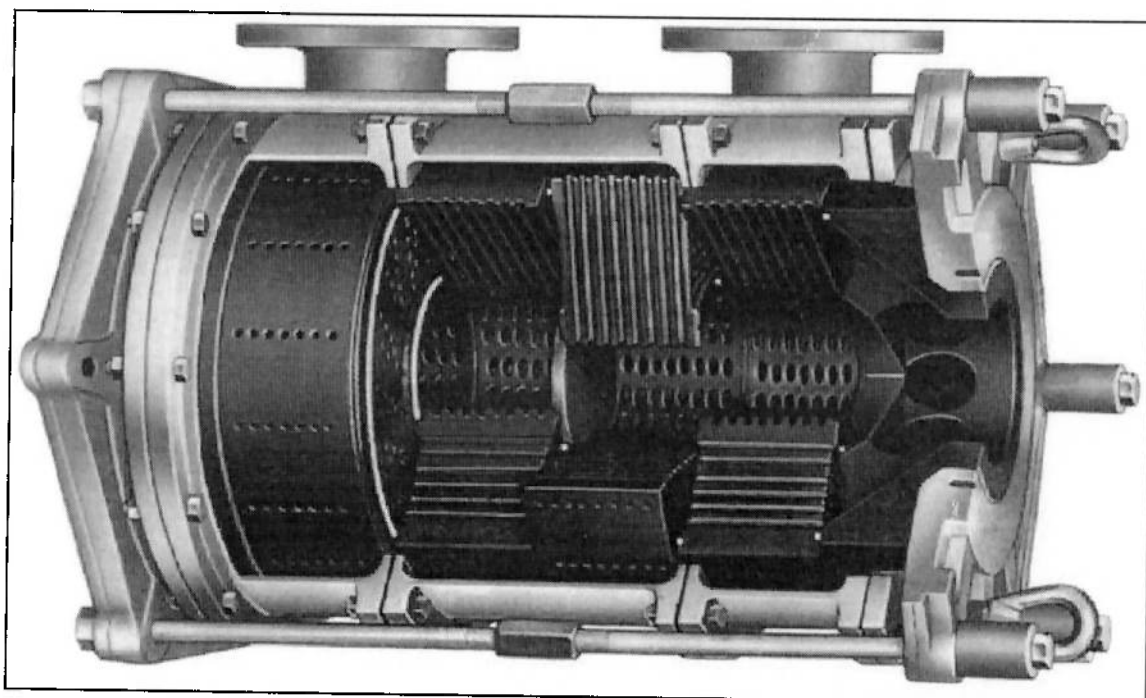


Figura 32 – Seção transversal do trocador evidenciando os furos nos blocos⁵

No caso das linhas de Decapagem, o fluído quente é o vapor de água que escoar na carcaça, externamente aos blocos, por razões que visam minimizar a perda de carga durante o escoamento e minimizar os riscos, caso ocorra vazamentos, para o exterior do trocador e o fluído frio é o ácido clorídrico que escoar internamente nos orifícios dos blocos.

2.2. ANÁLISE DA CORROSÃO NO TROCADOR

Nota-se que a corrosão mostrada no interior da carcaça devido ao contato do vapor de água com a carcaça de aço carbono, concentra-se com maior intensidade nas extremidades da mesma, como mostrado na figura 33 e em detalhe na figura 34, e nas regiões onde existe o contato de um bloco de grafite com o outro, região onde também se encontram as chicanas, figura 35 e em

detalhe na figura 36, isto se deve ao fato de serem locais onde a turbulência do escoamento é maior, assim sendo esta região sofre forte impactos devido à colisão do fluido, pois existem barreiras para o escoamento do mesmo e juntamente com a temperatura, aceleram o processo de corrosão conhecido como corrosão-erosão.

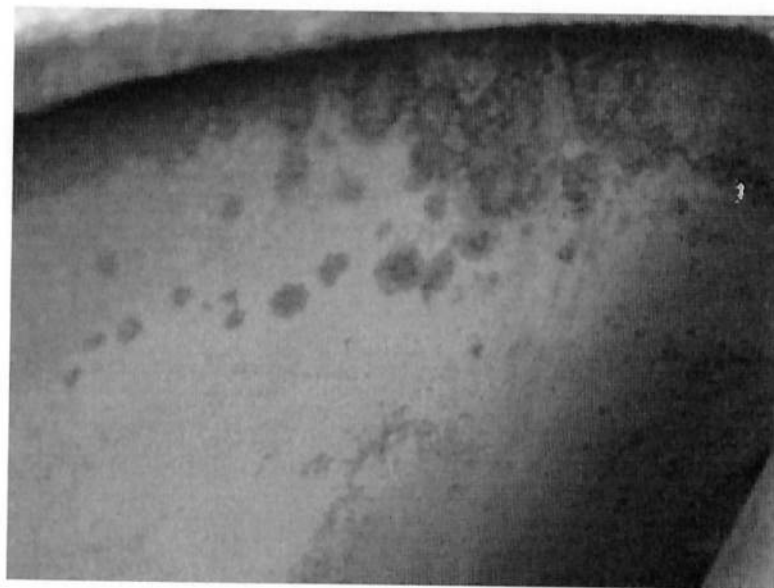


Figura 33 – Corrosão-erosão na extremidade da carcaça do trocador



Figura 34 – Detalhe da corrosão-erosão na extremidade da carcaça do trocador

Evidencia-se que a corrosão decresce à medida que se distancia da extremidade da carcaça, entretanto, quando se está próximo da chicana nota-se que a corrosão aumenta à medida que se está mais próximo da mesma. Repete-se esse processo ao longo de toda a carcaça, até a outra extremidade, onde também são encontrados pontos de corrosão com as mesmas características.

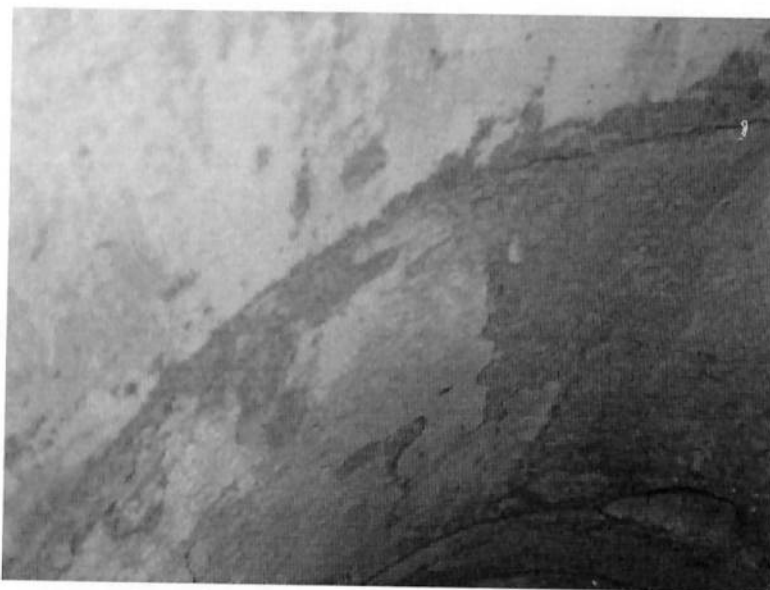


Figura 35 – Corrosão na região de contato das chicanas com a carcaça



Figura 36 – Detalhe da corrosão na região de contato das chicanas com a carcaça

Não se evidencia a corrosão nos blocos de grafite devido ao contato do ácido clorídrico, conforme mostrado na figura 37. Pode-se observar na face externa aos blocos, manchas avermelhadas que são produtos provenientes da corrosão-erosão da carcaça, no caso, estes produtos são micro partículas de óxido de ferro que são removidos a cada impacto do fluído na região.

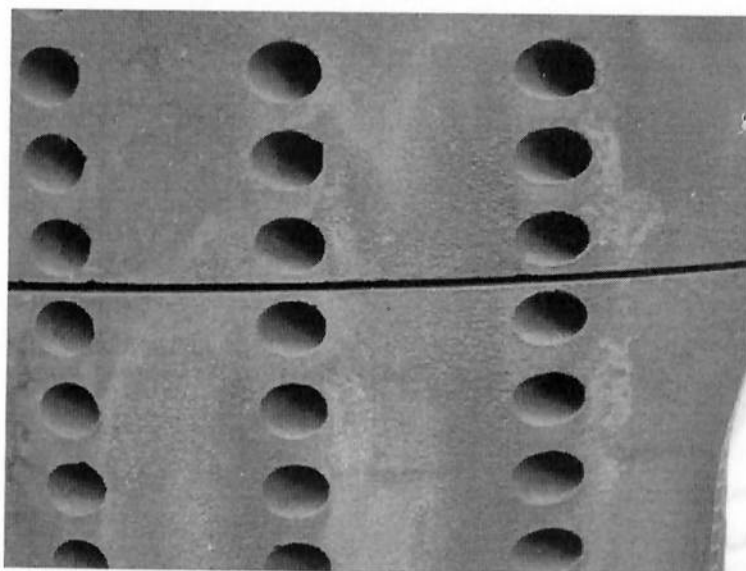


Figura 37 – Produtos da corrosão da carcaça nos blocos de grafite

Analisando a corrosão nos cabeçotes, pode-se concluir que o mesmo apresenta pontos de corrosão na face interna, onde há o contato direto com o ácido clorídrico que escoia no interior dos blocos de grafite.

Nota-se que na face rebaixada interna do cabeçote, figura 38, há a presença de depósitos semelhantes aos encontrados nos furos dos blocos de grafite. Estes depósitos são óxidos de ferro que são formados a partir do contato do ácido clorídrico com o aço, formando uma corrosão uniforme em toda a face de contato.

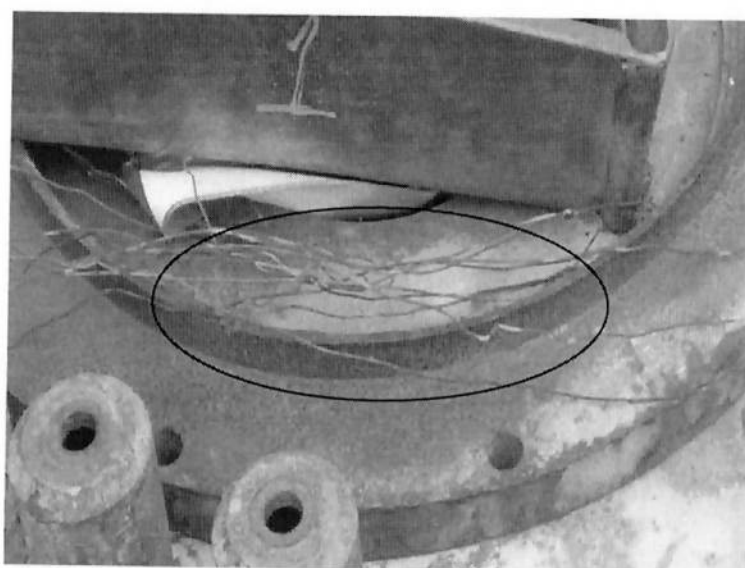


Figura 38 – Corrosão na parte interna do cabeçote

Nas figuras 39 e 40, pode-se concluir que, os blocos de grafite não são susceptíveis à corrosão devido ao contato direto do ácido clorídrico, pois o mesmo não reage com o grafite, estes depósitos são produtos provenientes da reação do cabeçote que é fabricado em aço carbono e o ácido clorídrico, que são transportados pelo fluído para esta região.

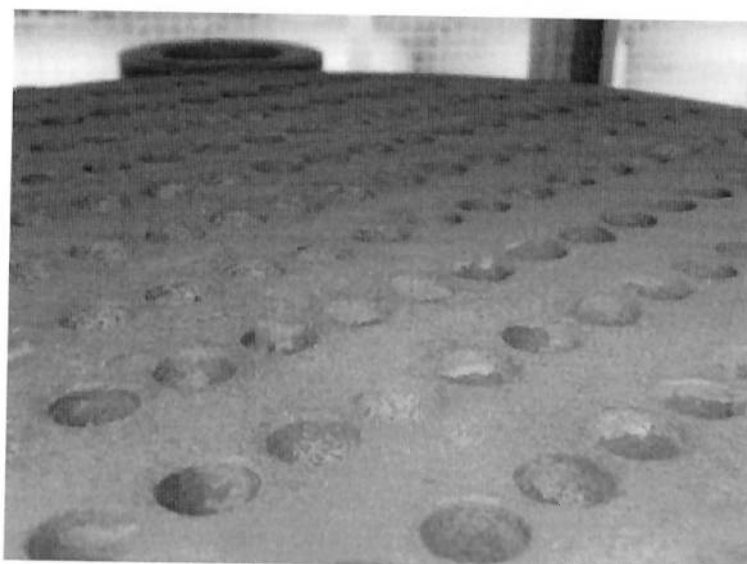


Figura 39 – Produtos da corrosão nos orifícios dos blocos

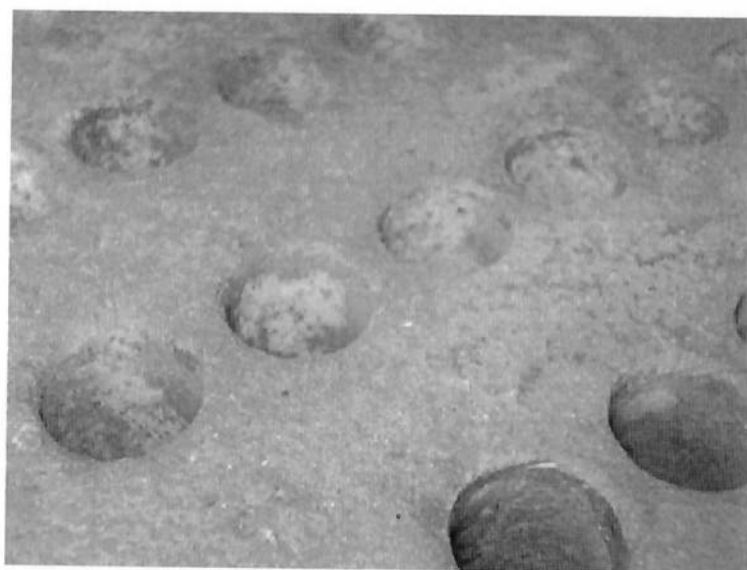


Figura 40 – Detalhe dos produtos da corrosão nos orifícios dos blocos

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. COMPARATIVO ENTRE OS TROCADORES APRESENTADOS

Nesta seção estão apresentados os resultados comparativos dos três tipos de trocadores apresentados. Os critérios apresentados são conclusivos e visam justificar a escolha do trocador de calor que opera atualmente.

Antes da apresentação dos resultados propriamente ditos, convém mencionar algumas considerações:

- 1 – A análise vale apenas para a aplicação a qual o trocador se destina, ou seja, apenas para a operação com os fluídos apresentados, ácido clorídrico escoando no interior dos blocos e o vapor de água escoando na parte interna da carcaça, externamente ao blocos;
- 2 – No estudo comparativo dos preços, não foi mencionado o valor exato dos mesmos no intuito de resguardar assuntos que são de uso exclusivo das empresas que fabricam o mesmo;
- 3 – Assumiu-se que o trocador tipo casco-tubo, embora seja o trocador mais barato, é fabricado com materiais nobres, resistentes à corrosão, para atender mesmo que de maneira satisfatória aplicação do mesmo;
- 4 – O item manutenção, abrange a facilidade com que é feita a manutenção do trocador com relação à velocidade de reposição dos sobressalentes e facilidade de acesso para a limpeza e no aspecto flexibilidade, é levado em consideração a mobilidade do trocador de aumentar ou diminuir a eficiência de troca térmica, com a alteração das partes internas que realizam a troca térmica do mesmo;

5 – O grau de incrustação refere-se à probabilidade de sujeira, depósitos provenientes do processo corrosivo acumularem-se no interior do trocador, ocasionando a perda da eficiência de troca térmica, aumento da perda de carga e paradas emergências no equipamento;

6 – A avaliação foi feita levando-se em consideração o seguinte critério: 1 a 5, sendo a nota 1 igual à ruim e a nota 5 igual a ótimo, e tem como objetivo avaliar qualitativamente os trocadores apresentados e chegar a uma conclusão da melhor aplicação para o processo proposto.

Tabela 3.1 – Avaliação qualitativa dos trocadores propostos

CARACTERÍSTICAS DOS TROCADORES				
TIPO DE TROCADOR	PREÇO	FLEXIBILIDADE E MANUTENÇÃO	CORROSÃO EM CONTATO COM HCl	CORROSÃO EM CONTATO VAPOR DE ÁGUA
CASCO-TUBO	1	1	1	3
PLACAS	2	5	2	4
GRAFITE	4	4	5	4
TIPO DE TROCADOR	ESPAÇO FÍSICO	EFICIÊNCIA DE TROCA TÉRMICA X TAMANHO	GRAU DE INCRUSTAÇÃO	TOTAL
CASCO-TUBO	1	3	2	12
PLACAS	5	5	4	27
GRAFITE	5	4	4	30

3.2. PROPOSTAS DE PROTEÇÃO CONTRA A CORROSÃO

Visando combater a corrosão de maneira eficaz e aumentar ainda mais o tempo de vida útil do equipamento e sua confiabilidade de operação, minimizando assim o número de intervenções para manutenção, sugere-se duas medidas principais, são elas:

1 – A instalação de buchas de grafite nas regiões de maior susceptibilidade à corrosão. Regiões em destaque na figura 41.

As buchas são do mesmo material dos blocos internos e possuem elevada resistência à corrosão devido ao contato com o ácido clorídrico. Pretende-se com essa solução proteger a região da reação do aço com o ácido clorídrico e também reduzir os efeitos do impacto direto do fluído na região, causando assim a corrosão-erosão.

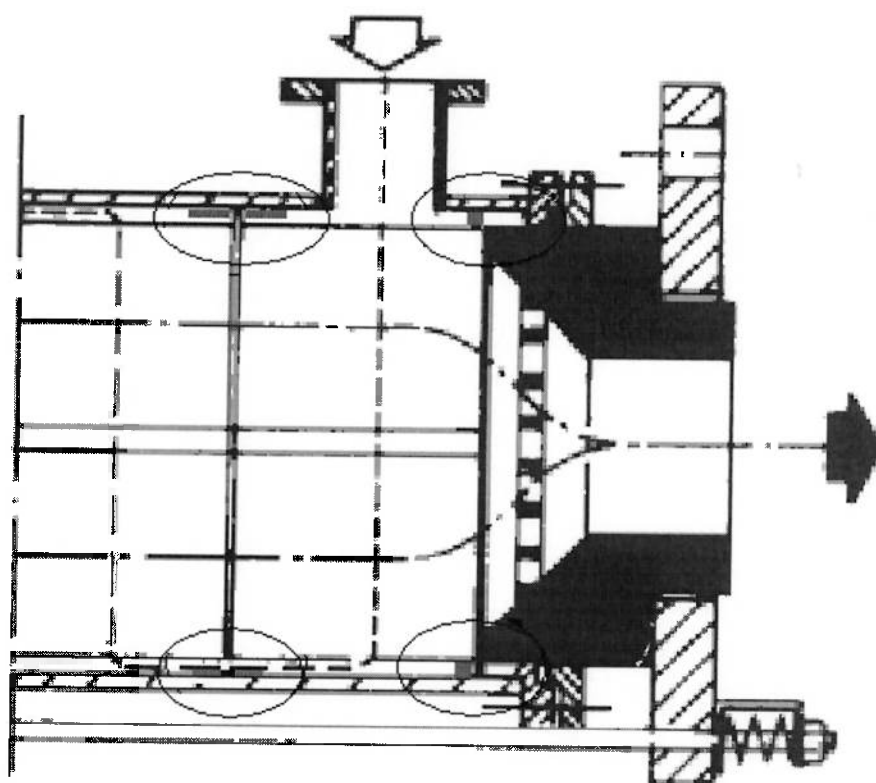


Figura 41 – Seção do trocador evidenciando a instalação de buchas de grafite

2 – Revestir todo o interior da carcaça e do cabeçote com aplicação de polietileno de alta densidade (PAD) ou politetrafluoretileno (Teflon) que são produtos inertes, não reagem quando expostos em ambientes corrosivos, têm excelente resistência e durabilidade quando operam até 260°C e possuem baixa condutividade térmica. Pode-se também fazer a aplicação de resinas fenólicas e epoxídicas ou epóxi.

3 – Sugere-se também fazer uma modificação no projeto do trocador nas regiões mais propensas a sofrer o processo corrosivo, eliminando os cantos vivos com chanfros ou raios, minimizando o choque do líquido nessas regiões, principalmente nas extremidades do trocador. Pode-se também instalar chapas defletoras nestas regiões, de modo que elas possam impedir o choque direto do fluído com a carcaça e com o cabeçote, é a medida mais simples, barata e pode ser feita no local onde está o trocador.

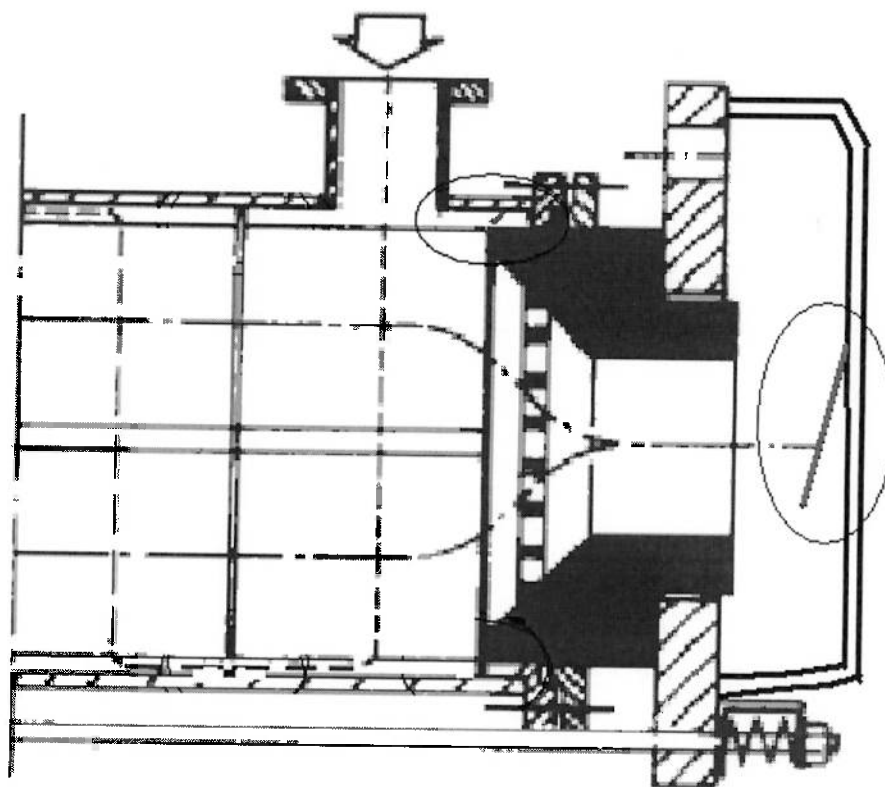


Figura 42 – Seção do trocador evidenciando a instalação de chapas defletoras

4. CONCLUSÃO

Concluí-se que a corrosão no interior dos trocadores de calor de blocos de grafite concentra-se nas extremidades do mesmo e nas regiões onde existem as chicanas, pois são barreiras que impedem e redirecionam o fluxo do fluido para uma outra direção, portanto, após sucessivos impactos, esta região sofre um processo de degradação, conhecido como corrosão-erosão.

Os espelhos do trocador sofrem corrosão do tipo uniforme, nota-se a presença de óxidos de ferro em virtude da reação do ácido clorídrico com o aço carbono. O grafite é imune a ação do ácido clorídrico e da água, pois o mesmo é composto de carbono e piche, que são produtos inertes quando em contato com o ácido clorídrico e revestidos por resina fenólica conferindo boas propriedades mecânicas.

O tipo de trocador que melhor se adapta à aplicação é o trocador em blocos de grafite, pois combina uma boa resistência à corrosão na presença do ácido clorídrico com a alta capacidade de troca térmica, devido aos altos valores de condutividade térmica do aço e do grafite, diferente dos demais trocadores, que apesar de possuir boa capacidade de troca térmica, não possuem resistência à corrosão.

Nos pontos onde se observou a ocorrência de corrosão, pode-se instalar buchas de grafite, bem como aplicar revestimentos de polietileno de alta densidade ou politetrafluoretileno, aplicar resina fenólica, epóxi ou instalar chapas defletoras no interior do trocador. Tudo isso pode contribuir para minimizar a ocorrência dos processos de corrosão.

5. RECOMENDAÇÕES

Pode-se avaliar a corrosão e os efeitos da mesma nos demais componentes do sistema fechado de ácido clorídrico das Decapagens da Laminação a Frio, como: válvulas, luvas e tubos, e propor soluções para o referido problema.

As bombas que recalcam o ácido clorídrico também estão sujeitas à corrosão, sugere-se avaliar os impelidores/rotores do mesmo, pois podem sofrer corrosão-erosão e principalmente a cavitação, devido ao fato de serem equipamentos rotativos.

REFERÊNCIAS

- [1] ALFA LAVAL. Fabricante de trocadores de calor de placas. Disponível em: <<http://www.alfalaval.com>>. Acesso em: 15 março 2008.
- [2] BARACAT, D. E. **Transmissão de Calor** .1 . ed. São Bernardo do Campo : Paym, 1999. 289p.
- [3] CARACTERÍSTICAS de trocadores de calor de placas. Disponível em: <<http://www.plateconcepts.com>>. Acesso em: 15 março 2008.
- [4] CARBOCLORO. Informações técnicas e características do ácido clorídrico. Disponível em: <<http://www.carbocloro.com.br>>. Acesso em: 22 março 2008.
- [5] CARBONO LORENA. Fabricante de trocadores de calor em blocos de grafite. Disponível em: <<http://www.carbonelorraine.com>>. Acesso em: 22 março 2008.
- [6] GEA. Fabricante de trocadores de calor. Disponível em: <<http://www.gea-ecoflex.de>> Acesso em: 20 março 2008.
- [7] GENTIL, V.; **Corrosão**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 353p
- [8] KAKAÇ, S.; BERGLES, A. E.; MAYINGER, F. **Heat Exchangers: thermal-hydraulic fundamentals and design**. 2. ed. Washington DC: McGraw -Hill, 1981. 1131p.
- [9] KAKAÇ, S.; LIU, H. **Heat Exchangers: selection, rating and thermal design**. 1. ed. Washington DC: CRC, 1997. 432p
- [10] KERN, D. Q. **Process Heat Transfer**: 20. ed. Tokyo, Japan McGraw-hill, 1982. 871p.
- [11] TEMA; Tubular Exchanger Manufacturers Association, 6. ed, TEMA, 1978. 242p.
- [12] TRABANELLI, G.; ZUCCHI, F.; BRUNORO, G.; ROCHINI, G. **Corrosion inhibition of carbon and low alloy steels in hot hydrochloric acid solutions**: Disponível em: <<http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=4336609>> Acesso em: 18 fevereiro 2008.
- [13] COSIPA. Página da Intranet da Gerência de Laminação a Frio.